

Saimaan ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikka Imatra  
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Antti Hartikainen

# **KARTONKIKONEEN SÄHKÖKÄYTTÖJEN PÄIVITYS VALTA-AKSELIN POISTON YHTEYDESSÄ**

Opinnäytetyö 2011

## **TIIVISTELMÄ**

Antti Hartikainen

Kartonkikoneen sähkökäyttöjen päivitys valta-akselin poiston yhteydessä,  
100 sivua, 6 liitettä

Saimaan ammattikorkeakoulu, Imatra

Tekniikka, Sähkötekniikan koulutusohjelma

Sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto

Opinnäytetyö, 2011

Ohjaajat: lehtori Timo Loukiala Saimaan amk, KA1 päivämestari Tapio Rossi  
Stora Enso Oyj, kunnossapitopalveluvastaava Harri Siitonen Efora Oy

Opinnäytetyö tehdään Stora Enson Imatran tehtaille Kartonkikoneelle 1. Kartonkikoneella on käytössä valta-akseli, joka antaa mekaanisen käyttötehon koneen kahdeksalle käytölle. Työn tarkoituksena on perehtyä valta-akselikäytön päivittämiseen teknisesti nykypäivän tarpeiden mukaisesti sähkökäyttöjen osalta. Sähkökäyttöjen päivityksessä otetaan huomioon koneen nopeuden nosto nykyisestä 430 m/min nopeuteen 600 m/min. Nopeuden nostosta johtuen myös koneen muiden käyttöjen tehontarve arvioidaan uudelleen. Työssä esitellään miten kartonkikoneen sähkökäytöt tulisi mitoittaa ja millaisia vaatimuksia käytöt asettavat moottoreille ja niiden syöttölaitteille.

Työssä selvitetään erilaisien moottorityyppien soveltuvuutta uusittaville käytöille. Vaihtoehtoina sähkökäyttöjen moottoreiksi ovat tasavirtamoottori, vaihtovirtamoottori sekä kestopagnetoitu tahtimoottori. Moottoreiden syöttölaitteistoon perehdytään taajuusmuuttajien ja linjakäytön osalta. Sähköenergian hinnan kallistumisen myötä pohditaan myös sähkömoottoreiden energiatehokkuutta ja selvitetään moottoreiden hyötysuhteen merkitystä niiden elinkaaren aikana.

Nopeuden noston myötä moottoreiden kasvavaa tehontarvetta on arvioitu aikanaan kuivausryhmien inertiaan perustuvan laskentaohjelman avulla. Laskentaohjelmalla on saatu tarvittavat käyttöpisteiden mitoitusvahvuudet käytöille.

Työssä on esitelty kolme erilaista moottorityyppiä kartonkikoneelle. Vertailujen perusteella sähkökäyttöiksi ehdotetaan oikosulkumoottoreita ja kestopagnetoituja tahtimoottoreita linjakäyttöperiaatteella. Molemmat moottorityypit sopivat hyvin kartonkikoneen käytöille.

Avainsanat: Sähkökäyttö, tasavirtamoottori, oikosulkumoottori, kestopagnetoitu tahtimoottori, taajuusmuuttaja, linjakäyttö

## **ABSTRACT**

Antti Hartikainen

Upgrading Board Machine Drives in Connectin with Power Shaft Removal,  
100 pages, 6 appendices

Saimaa University of Applied Sciences, Imatra

Technology, Electrical Engineering

Electrical Power Engineering

Final year project, 2011

Tutors: Mr Timo Loukiala, Senior Lecturer, Saimaa University of Applied Sciences, Mr Tapio Rossi, BM1 Day Supervisor, Stora Enso Oyj, Mr Harri Siitonen, Foreman, Efora Ltd

This final year project was made in Stora Enso's Imatra Mills to the board machine 1, BM1. The BM1 has a power shaft which gives mechanical power to the eight drives. Five of these are the drying group's drives and three press group's drives. The purpose of this final year project was to design a technical upgrading to the power shaft drives. Increasing machine speed from 430 m/min to 600 m/min is taken into account in the upgrading process. When the speed is increased, also other drives' power demand must be estimated again. This thesis shows the design principle of drives and what kind of requirements the drives set on motors and their control devices.

This thesis presents how suitable the different types of engines are for upgrading the drives. Motors are direct current motors, induction motors and permanent magnet synchronous motors and also motors' control devices, drives (frequency converter) and multi drives. Engine efficiency is an important issue in the selection of the engine. Energy is expensive and thus it is economically to use high efficiency motors. The thesis presents graphically the effect on the cost efficiency of motors.

Power growth has been estimated several years ago with spreadsheet program. Capacities are based on the determination of the drying cylinders' inertia. Calculated capacities of drives are rated power.

In the thesis are presented three different types of the motors for the board machine 1. The comparison shows that electrical drives can be proposed for the induction motors and permanent magnet synchronous motors with multi drive system. Both are well suited to board machine 1 drives.

Keywords: Electric System, Direct Current Motor, Induction Motor, Permanent Magnet Synchronous Motor, Driver and Multi Drive

# SISÄLTÖ

JOHDANTO .....	9
1 STORA ENSO OYJ .....	11
2 KARTONKIKONE 1 .....	11
3 KARTONGIN VALMISTUS .....	13
3.1 Massasulpun valmistus.....	14
3.2 Rainan muodostus.....	15
3.3 Kartonkikoneiden puristinosat.....	16
3.4 Kuivatusosa .....	17
3.5 Kalanterit.....	17
3.6 Rullaus.....	17
3.7 Jälkikäsittely.....	17
3.8 Vesijärjestelmät .....	18
3.9 Hylkyjärjestelmä.....	19
4 KARTONKIKONEEN KÄYTTÖJÄRJESTELMÄLLE ASETETTAVAT VAATIMUKSET KÄYTTÖJEN KANNALTA.....	19
4.1 Kartonkikoneen rakenne .....	19
4.1.1 Viiraosa .....	19
4.1.2 Puristinosat.....	20
4.1.3 Kuivatusosa .....	21
4.1.4 Liimapuristin, välipuristin, kiillotuskalanteri .....	21
4.1.5 Konekalanterit.....	22
4.1.6 Rullaimet .....	23
4.1.7 Päälystinyksiköt .....	24
4.1.8 Sekoituspumppu.....	24
4.2 Kartonkikoneen säätöjärjestelmät.....	25
4.3 Käyttökoneiston mitoitukseen vaikuttavat tekijät.....	26
4.4 Ympäristöolosuhteet käyttöjen kannalta .....	27
4.5 Käytön ohjaus- ja valvontalaitteet .....	27
4.6 Sähkökäyttöjen kunnossapito .....	28
5 KÄYTTÖJEN TEKNIKKAA.....	29
5.1 Mekaaninen osuus.....	29
5.1.1 Valta-akseli.....	29
5.1.2 Vaihde .....	33
5.1.3 Kytkin.....	37
5.2 Sähkötekniillinen osuus .....	39
5.2.1 Valta-akselin moottorikäyttö .....	39
5.2.2 Kartonkikoneen muut sähkökäytöt.....	41
5.3 Valta-akselikäytön vahvuudet ja heikkoudet .....	42
6 SÄHKÖKÄYTÖT .....	43
6.1 Tasavirtakone .....	49
6.2 Vaihtovirtakone .....	52
6.3 Tahtikone .....	59
6.4 Taajuusmuuttaja .....	64
6.5 Linjakäyttö.....	70
7 SÄHKÖKÄYTTÖJEN KÄYTTÖHÄIRIÖT .....	72

8	SÄHKÖKÄYTÖN VALINTA- JA MITOITUSTEKIJÄT .....	75
8.1	Käytön mitoitus .....	76
8.2	Kuormitusvääntömomentti .....	77
8.3	Moottorin mitoitus ja vastamomentti .....	77
8.4	Moottorin syöttölaitteiden mitoitus.....	78
8.5	RDC ja NRL .....	79
9	SUORITETUT MITTAUKSET .....	80
10	MOOTTOREIDEN ENERGIATALOUS .....	81
10.1	Hyötysuhde .....	81
10.2	Häviöt.....	82
10.3	Standardointi.....	83
10.4	Elinkaarikustannukset.....	84
10.5	Moottorikäyttöjen energiatehokkuus teollisuudessa.....	87
10.6	Talousnäkökulma.....	88
11	MOOTTORIVAIHTOEHTOJEN VERTAILU .....	90
12	KÄYTTÖJEN VALINTA.....	91
12.1	Sähkökäyttövalinnat.....	91
12.2	Valinnan perusteet.....	92
13	NOPEUDEN NOSTOON LIITTYVÄT YLEISET TEKIJÄT .....	93
14	PÄÄTELMÄT .....	94
	KUVAT .....	96
	TAULUKOT .....	97
	LÄHTEET .....	98

## LIITTEET

Liite 1 Valta-akselikäytön pääpiirikaavio ja moottorin magnetointipiirikaavio

Liite 2 Käyttöjen nykyiset moottoritehot ja uudet mitoitettut RDC-tehot

Liite 3 Käyttöjen esittely

Liite 4 Moottorityyppien keskinäinen vertailu

Liite 5 Kartonkikoneen kuivausryhmien tehontarpeen muodostuminen

Liite 6 Vaihteen valinta

## LYHENNELUETTELO

### Isot latinalaiset kirjaimet

B	magneettivuon tiheys (T)
C	kapasitanssi (F)
D	moottorin akselin puoleinen pää (drive end), moottorin kolmiokäämitys
I	virta (A)
J	hitausmomentti ( $\text{kgm}^2$ )
L	induktanssi (H)
M	vääntömomentti (Nm)
N	moottorin akselin vastakkainen pää (non drive end)
P	teho (W)
R	vastus ( $\Omega$ )
U	jännite (V)
V	tilavuus ( $\text{m}^3$ )
Y	moottorin tähtikäämitys

### Pienet latinalaiset kirjaimet

<i>a</i>	pituus (m)
<i>d</i>	halkaisija (mm), muutos
<i>f</i>	taajuus (Hz)
<i>k</i>	kerroin, rakennevakio
<i>l</i>	roottorin sivun tehollinen pituus
<i>n</i>	pyörimisnopeus (r/min)
<i>p</i>	moottorin napaparien lukumäärä
<i>r</i>	säde (m)
<i>s</i>	jättämä (%)
<i>t</i>	aika (s)
<i>v</i>	ratanopeus (m/min)

### Kreikkalaiset kirjaimet

$\alpha$	kulma
$\Phi, \Psi$	magneettivuo (Vs)
$\Delta$	ero

$\eta$	hyötysuhde (% , suhteellinen)
$\omega$	kulmanopeus (rad/s)
$\rho$	tiheys (kg/m <sup>3</sup> )

### **Alaindeksit**

a, A	ankkurissa
anto	moottorin akseliteho
dyn, n	dynaaminen nopeus
friction	tuuletin-, kitka- ja laakerihäviö
h	huopatelojen tuoma osuus, huippuarvo
H	häviö
häviöt	häviö
Input	sisääntulo
kiihd	kiihdytyksen aikainen osa
kiihd r	kiihdytyksen aikainen osa ryhmää kohden
k	kuormituksen tuoma osuus
LL	lisähäviö
m	magnetointi
iron	staattorin rautahäviö
max	maksimiarvo
<i>n</i>	nimellinen
otto	moottorin verkosta ottama sähköteho
Output	ulostulo
rotor	roottorin rauta- ja kuparihäviö
s	synkroninen
syl	sylintereiden osuus
winding	staattorin käämityksessä syntyvä häviö

### **Yläindeksit**

'	moottorin akselille redusoitu
---	-------------------------------

### **Lyhenteet**

ABB	Asea Brown Boweri
AC	vaihtovirta, alternating current
DBU	dynamic control unit

DC	tasavirta, direct current
DCU	control unit
DSU	diode supply unit
DTC	direct torque control
dx	tiheysjakauma
EFF	moottoreiden vanha hyötysuhdeluokitusjärjestelmä (Electronic Frontier Foundation)
EMC	electromagnetic compatibility
EU	Euroopan unioni
FDA	Food And Drug Administration
FSC CoC	puun alkuperäketjun hallintajärjestelmä
Id	vektorisäädössä vuohon nähden yhdensuuntainen komponentti
IE 1-4	moottoreiden uusi hyötysuhdeluokitusjärjestelmä
IEC	International Electrotechnical Commission
IGBT	isolated gate bipolar transistor
Iq	vektorisäädössä vuohon nähden kohtisuorassa oleva komponentti
ISO	kansainvälinen standardisoimisjärjestö
ISU	IGBT- syöttöyksikkö, IGBT supply unit
KA	kartonkikone
LC	induktanssi-kapasitanssi piiri
NRL	käyttöpisteen normaaliajoteho, normal running load
OHSAS	työterveys ja turvallisuusjärjestelmä, standardi
PIV	powered industrial vehicle
PK	paperikone
PT-100	platinasta valmistettu lämpötila-anturi
PTC	termistori, Positive Temperature Coefficient
PWM	pulssinleveysmodulaattori, pulse-width modulation
RDC	käyttöpisteen mitoitusoteho, recommend drive capacity
Rs	sisäsäde (m)
Ru	ulkosäde (m)
TSU	thyristor supply unit



## **JOHDANTO**

Opinnäytetyö tehdään Stora Enson Imatran tehtaille Kaukopäähän kartonkikonelinjalle 1. Työn kohteena ovat kartonkikoneen valta-akselikäyttö sekä muut koneen käyttöryhmät sähkökäyttöjen osalta.

Valta-akseli pyörittää kartonkikoneen kuivausryhmien käyttöjä sekä kolmea puristinosan käyttöä. Valta-akselikäyttöä on uudistettu aikanaan joitakin kertoja, mutta se on pysynyt alkuperäisen Marshallin mallin mukaisena käyttönä.

### **Työn lähtökohdat**

Toimiessani sähköasentajana kesällä 2010 kartonkikoneen ympäristössä mieltäni askarrutti koneen nykyinen jo vanhanaikainen tekniikka ja sen luotettavuus. Koneen käytöt vaativat jatkuvaa huoltoa ja mekaanista kunnossapitoa. Asiaa pohtiessani sain siitä sopivan aiheen opinnäytteeksi.

Kartonkikoneen ajamalla tuotteella on suuri kysyntä ja tällä hetkellä tuotantokapasiteetti on huipussaan. Yhtiö on uudistamassa vanhaa konetta uudemmallalla tekniikalla lähivuosina. Näin saadaan käyttöihin varmempaa tekniikkaa ja nopeuden nosto nykyisestä nopeusmaksimista 430 m/min viiraosan mitoitettuun nopeuteen 600 m/min. Tällöin tuotannon kasvattaminen on mahdollista koneen sähkökäyttöjen osalta.

Valta-akselin moottorina on 938 kW Westinghousen tekemä tasasähkömoottori. Moottori on käytölle ylimitoitettu, erittäin harvinainen, ja sen ohjauselektronikka on vanhanaikaista. Valta-akselikäyttö on mekaaninen järjestelmä, josta teho johdetaan hihnakäyttöjen välityksellä kytkimille, vaihteille ja lopulta käyttökohteille. Tämä tekniikka on epäedullinen käyttää ja se vaatii jatkuvaa huoltoa ja kunnossapitoa toimiakseen. Koneen muiden käyttöjen moottorit ovat pääsääntöisesti tasavirtamoottoreita.

Työn tekemisessä on käytetty apuna Stora Enson kunnossapitoyhtiön Eforan osaamista sähköteknisissä asioissa ja Stora Enson henkilökuntaa prosessiteknisissä asioissa. Tietoa kerätään tehtaan omista sähköisistä tietojärjestelmistä, alan kirjallisuudesta ja saatavilla olevista tietolähteistä.

## Tavoitteet

Työn tavoitteena on tutkia kartonkikoneen käyttöjen moottoreille ja niiden syöttölaitteistoille asettamia vaatimuksia sekä pohtia erilaisia teknisiä vaihtoehtoja sähkökäyttöjen toteuttamiseksi. Samalla perehdytään kartongin valmistukseen sekä itse kartonkikoneen rakenteeseen. Lähtökohtaisesti mietitään sähkökäyttöjen uusintaa valta-akselin ympäristössä, mutta koska kartonkikoneen rakenteellista nopeutta halutaan nostaa viiraosan mitoitettuun nopeuteen 600 m/min, niin otetaan kantaa myös koneen muiden käyttöjen moottoreiden mitoitukseen ja valintaan.

Työssä otetaan esille kartonkikoneen 1 sähkökäyttöjen moottoreiden ja uusien tarjolla olevien moottorivaihtoehtojen hyötysuhteet ja niiden vaikutukset energian kulutukseen. Perehdytään käyttöjen käyttöhäiriöihin ja toimintavarmuuteen niin vanhojen kuin uusienkin sähkökäyttöjen osalta. Moottorivertailuun otetaan kolme erilaista moottorivaihtoehtoa, joita vertaillaan teknisesti erilaisista näkökulmista. Vertailussa on mukana tasavirtamoottori, oikosulkumoottori ja kestopromagneetit tahtimoottori sekä moottoreiden syöttölaitteet taajuusmuuttaja ja linjakäyttö. Vertaillaan mm. sitä, millaisia ominaisuuksia moottorit tarjoavat, miten uudet sähkömoottorit tulisi mitoittaa ja mitä tulisi ottaa mitoittamisessa huomioon. Moottoreiden hankintahintoihin ja investointikustannuksiin ei työssä oteta kantaa, eikä mitoituksessa ei oteta kantaa moottoreiden syöttölaitteistojen mitoitukseen, vaan ne tulee valita erikseen moottoreiden ja haluttujen ominaisuuksien mukaan.

Talousnäkökulmaa tuodaan työssä esille energialaskelmien muodossa ja samalla pohditaan millaista taloudellista hyötyä uudet paremman hyötysuhteen laitteet tuovat energian kulutuksen suhteen. Moottorivertailuista ja vertailun laskelmista saadut tulokset auttavat ymmärtämään moottoreiden valinnan tärkeyttä energian käytön näkökulmasta ja tällä tavoin tiedot helpottavat sähkökäyttöjen valintoja kartonkikoneelle.

Lopuksi tehdään yhteenveto vertailun sähkökäyttöjen laitteista ja ehdotetaan hyviä ja käyttökelpoisia moottori- ja syöttölaitteiden vaihtoehtoja kartonkikoneen sähkökäyttörajoitukseksi käyttöä päivitettäessä.

## **1 STORA ENSO OYJ**

Stora Enso on maailman laajuinen paperi-, pakkaus- ja puutuotealalla toimiva yhtiö. Yhtiö tuottaa sanomalehti- ja kirjapaperia, aikakauslehti- ja hienopaperia, kuluttajapakkauskartonkia, teollisuuspakkauksia sekä puutuotteita.

Työntekijöitä koko yhtiössä on n. 26 000 yli 35 maassa. Suomessa työntekijöiden osuus on n. 26 %, josta Imatran tehtaot työllistävät n. 1000 henkeä. Yhtiön liikevaihto oli vuonna 2010 10,3 miljardia euroa. Suomessa on paperi- ja kartonkikapasiteettia maailmanlaajuisesti eniten 38 % osuudella.

Yhtiön toimitusjohtajana toimii Jouko Karvinen, ja Imatran tehtaita on johtanut Ari-Pekka Määttänen 7.3.2011 alkaen Ari Johanssonin siirryttyä muihin tehtäviin.

Imatran tehtailla Kaukopäässä konelinjoja on viisi, joista PK8 on ollut poissa käytöstä jo kuukausia. Muita koneita ovat KA1, KA2, KA4 ja PK6. Tainion tehtailla on käytössä kaksi konelinjaa KA5 ja PK7. (Imatramills.)

### **Kunnossapitoyhtiö Efora Oy**

Efora Oy on ABB:n ja Stora Enson yhteisyritys, jonka toimitusjohtajana toimii Toni Turkama. Efora Oy on kunnossapito- ja engineering-palveluihin erikoistunut yritys, joka on teollisuuden tuotantolinjojen elinkaaren hallinnan, tuotantotehokkuuden, häiriöttömän käynnin turvaamisen ja kehittämisen osaaja.

Eforan liiketoimintamalli perustuu ABB Full Service® -konseptiin. Yhtiö aloitti toimintansa 1.1.2009. Yhtiöstä Stora Enso omistaa 51 prosenttia ja ABB 49 prosenttia. Yhtiöllä on toimipisteitä Heinolassa, Helsingissä, Imatralla, Kemissä, Oulussa, Uimaharjussa ja Varkaudessa. (Eforanet.)

## **2 KARTONKIKONE 1**

Stora Enson Imatran tehtailla Kaukopäässä Kartonkikone 1 (KA1) on valmistunut Beloitin tekemänä vuonna 1950, jolloin kartongin valmistus paikkakunnalla alkoi. Konetta on vuosien aikana päivitetty moneen kertaan tuotannon ja laadun parantamiseksi.

Merkittävämmät tekniset muutokset koneelle ovat olleet

- 1985 yläviirayksikön lisäys
- 1986 puristinosan modernisointi ja uusi pintaperälaatikko
- 1987 uusi pope-rullain ja pituusleikkuri
- 1991 neljä kuivatussylinteriä välipuristimen tilalle, radan koostumuslaite, profiilin säätölaite, calendizer-höyrylaatikko, 2. kalanteri ja Kusters-tela
- 1999 viiraosan uusinta, alaviiralle kerrosperälaatikko; 3-kerrostuote, kerroskohtaiset massajärjestelmät.



Kuva 2 KA1 kuivapää

Kartonkikoneen nykyinen kapasiteetti on 170 000 t/a maksimirataleveyden ollessa 4,4 m. Ajettavan laadun mukaan ratanopeus vaihtelee 150 - 430 m/min ja neliögrammapaino 170 - 420 g/m<sup>2</sup> välillä. Viiran leveys koneessa on 4,93 m ja käyttöhenkilökuntaa 8 + 1.

Kone tuottaa kolmikerroskartonkia, valkoista päällystämätöntä elintarvike- ja nestepakkauskartonkia. Tuotteina ovat juomakuppi-, vuoka- ja nestepakkaus-

kartonkeja. Raaka-aineena käytetään valkaistua koivusellua ja liimauksessa hartsi- tai neutraaliliimausta.

Vaikeimmin ajettavia laatuja ovat pienimmän neliögrammapainon tuotteet. Tällöin katkoriski koneella on suurimmillaan. Myös liimauksessa liimojen vaihtaminen hartsi- ja neutraaliliimauksen välillä saattaa laadullisia heilahtelua esiintyä. (Imatramills.)

### **KA1 saavutukset lähihistoriassa**

Vuorokausiennätys	28.11.2002	649, 395 t/vrk
Kuukausiennätys	2006 tammikuu	15 235 t/kk
Vuosiennätys	2006	162 181 t/v

Yhteistuotanto Imatran tehtailla vuonna 2009 oli 968 767 tonnia, josta KA1 osuus oli 129 956 tonnia.

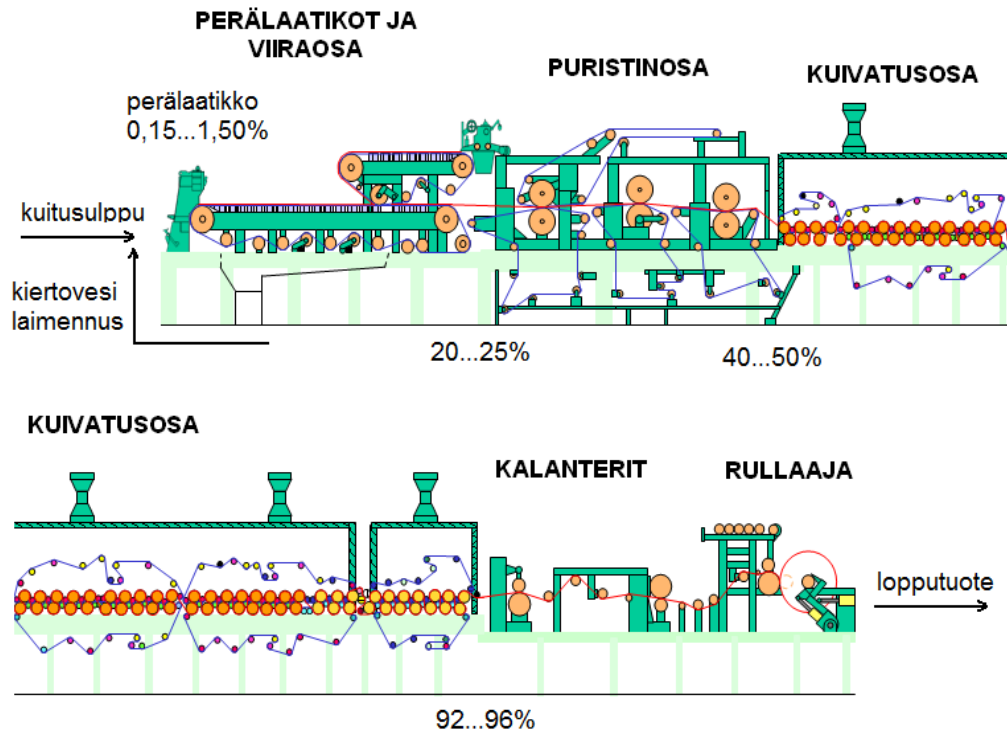
Imatran tehtaiden laatusertifikaatit:

- ISO 9001 laatujärjestelmä vuodesta 1992
- ISO 14001 ympäristöjärjestelmä vuodesta 1997
- ISO 22000 tuoteturvallisuusjärjestelmä vuodesta 2007
- FSC CoC puun alkuperäketjun hallintajärjestelmä vuodesta 2006
- OHSAS 18001 työterveys ja turvallisuusjärjestelmä vuodesta 2006
- FDA Imatran tehtailla on voimassa yhdysvaltalainen sertifikaatti vuodesta 2007. (Imatramills.)

## **3 KARTONGIN VALMISTUS**

Paperi- ja kartonkikoneista puhuttaessa eroavat koneet pääasiassa vain tuotetun lopputuotteen neliömassan perusteella. Tässä työssä käytetään termiä ”kartonkikone”, vaikka pääasiassa sama tekniikka on käytössä molemmissa koneityypeissä.

Kuva 3 esittää kartonkikone 1:n rakenteen pääpiirteittäin. Kuvasta nähdään kartonkirainan kuiva-ainepitoisuus prosenttiosuutena radan eri osa-alueiden taitekohdissa perälaatikolta rullaajalle.



Kuva 3 Vuonna 1950 Beloitin valmistama kartonkikone 1 (Imatramills)

### 3.1 Massasulpun valmistus

#### Massankäsittely

Massankäsittely on tärkeä osakokonaisuus kartonginvalmistusprosessista, joka sijoittuu massatehtaan ja paperitehtaan väliin. Massankäsittelyn tehtäviin kuuluu mm. massojen hajotus, kuidutus, jauhatus, puhdistus, annostelu sekä kuitujen ja kiintoaineen talteenotto. Massankäsittely toimii myös puskurina ja häiriösuojana kartonkikoneen ja massatehtaan välillä.

Imatralla Kaukopäässä on integroitu sellutehdas kartonkitehtaan yhteyteen. Selumassa pumpataan putkimassana sellutehtaalta massatorneihin. Näin ei tarvita erikseen kartonkitehtaan massankäsittelyssä muualla tuotettujen sellupaalien käsittely- ja pulpperointijärjestelmää.

Kartonki muodostuu yhdestä tai useasta kerroksesta, joiden laaduilla on erilaisia vaatimuksia. Kartonkitehtaat käyttävät samanaikaisesti usein erilaisia massareseptejä. Tällöin tarvitaan erilaisia massoja rainan pinta-, suoja-, runko- ja taustakerroksiin. Kartongin valmistus kerroksittain tekee massanvalmistuksesta monimutkaisen ja laajan prosessin. (Knowpap 7.0 2005.)

## **Jauhatus**

Jauhatuksella on keskeinen osuus kartongin valmistuksessa. Kartongin jauhatuksella voidaan vaikuttaa lopputuotteen laatuun ja valmistuskustannuksiin. Puusta irrotetut puukuidut ovat jäykkiä ja huonosti sitoutuvia, joten kuidut eivät sellaisenaan kelpaa kartongin raaka-aineeksi. Jauhatuksessa kuituja muokataan siten, että saavutetaan halutut laatu- ja sidosominaisuudet puukuiduille. Tavallisesti käytetään jauhatusmenetelmää, jossa jauhatus tapahtuu särmäterillä kuitujen ollessa vesilietteessä. Jauhatuksella pyritään lisäämään kuitujen sitoutumiskykyä alentamatta niiden jäykkyyttä.

Jauhatuksella voidaan vaikuttaa positiivisesti mm. kartongin vetolujuuteen, joka paranee jauhatusta lisättäessä, ja negatiivisesti mm. sen opasiteettiin. Kartongin laadun kannalta nämä ominaisuudet ovat kriittisiä, joten jauhatuksessa joudutaan tekemään kompromissi jauhatuksen määrää arvioidessa. (Sepsilva 1997.)

## **3.2 Rainan muodostus**

Rainan muodostukseen kuuluu perälaatikon syöttöputkisto, perälaatikko ja viiraosa kokonaisuudessaan. Monikerroskartongeilla on kullekin kerrokselle oma rainanmuodostusosa. Konekonsepteissa juuri rainanmuodostus muuttuu paperi- ja kartonkilajin vaatimusten mukaan merkittävimmin.

### **Perälaatikon syöttöputkisto**

Perälaatikon syöttöputkisto syöttää lyhyen kierron vedellä laimennetun putkimassan tasaisesti perälaatikkoon.

## **Perälaatikko**

Perälaatikko sijaitsee lyhyen kierron ja viiraosan välissä. Perälaatikon tehtävänä on syöttää massasulppu hallitusti kartonkikoneen levyiseksi rainaksi viiralle. Massasulppu sisältää puukuituja 0,15 – 1,5 % ja loput noin 99 % on vettä ja muita reseptiaineita. Nykyaikaisessa kartonkikoneessa on yksi tai useampi perälaatikko. Kartonkikoneella 1 on käytössä pintaperälaatikko sekä keski- ja pohjakerrospoterälaatikko. (Knowpap 7.0 2005.)

## **Viiraosa**

Viiraosan tehtävänä rainanmuodostuksessa on poistaa perälaatikon suihkuttamasta massasuspensiosta vettä viirankudoksen läpi viirakaivoon. Rainaan aiheutetaan hydrodynaamisia voimia flokkien (kuitukimppujen) syntymisen estämiseksi ja niiden hajottamiseksi. Veden poisto ja hydrodynaamiset voimat tulee hallita siten, että kuitu- ja täyteaineretentio ovat halutun suuruiset. Viiraosan lopussa rainalla on sellainen kuiva-ainepitoisuus, että siirto viiralta puristinosalle on helppoa ja puristinosalla saavutetaan hyvä ajettavuus. (Knowpap7.0 2005.)

### **3.3 Kartonkikoneiden puristinosat**

Puristinosan tehtävänä on poistaa vettä ja samalla tiivistää rainaa. Puristinosalla pyritään saavuttamaan hyvä märkälujuus, jotta rainan siirto kuivatusosalle onnistuu katkoitta. (Sepsilva 1997.)

Märkäpuristus tapahtuu tavallisesti joko puristinhuovan ja sileän telan välissä tai kahden puristinhuovan välissä. Sileän telan tilalla voi olla myös yksi tai useampia imuteloja veden poistoa tehostamassa. Puristettaessa ideana on se, että vedelle ei jää tilaa rainassa, vaan se poistuu rainasta puristinhuopaan (ja imuteleen). Rainasta ei voida kerralla puristaa suurta vesimäärää pois, vaan se on poistettava vaiheittain kahdella tai useammalla puristinnipillä. Vaiheittaisessa puristuksessa radan edetessä puristinnippien läpi voidaan puristinvoimaa kasvattaa vähitellen. Laiteteknisesti on mahdollista asettaa korkeat puristinpaineet viimeiseen puristinnippiin, mutta korkeita puristinpaineita käytettäessä puristin on herkkä värähtelylle. Tällöin myös rainan paksuus ohenee liikaa ja puristinhuovan käyttöikä lyhenee merkittävästi. (Knowpap 7.0 2005.)



### **3.4 Kuivatusosa**

Kuivatusosassa vettä poistetaan rainasta haihduttamalla. Haihduttamisen tulee tapahtua energiatehokkaasti, tasaisesti ja rainan laadun pitää pysyä hyvänä. Kuivatusmenetelmiä on yleisesti kolme: sylinterikuivatus, puhalluskuivatus ja säteilykuivatus. Yleinen periaate kaikille kuivatusmenetelmille on sama että rainaan tuodaan lämpöenergiaa, joka haihduttaa rainasta vettä, ja haihtunut vesi ohjataan pois radan läheisyydestä yleensä imureilla. Kuivatuksella vaikutetaan lopputuotteen laatuominaisuuksiin. (Knowpap 7.0 2005; Sepsilva 1997.)

### **3.5 Kalanterit**

Kalanteroinnin tarkoituksena on saada kartonkiin haluttu pinnan sileys ja kiilto sekä säätää lopullinen kartongin paksuus ja tiheys halutun suuruiseksi. Pintaominaisuuksien muutokset pyritään saamaan aikaan mahdollisimman pienellä paksuuden muutoksella, jotta bulkki säilyisi haluttuna. Bulkki tarkoittaa kartongin ominaistilavuutta. Kalanteri muodostuu kahdesta tai useammasta telasta, joiden muodostaman nipin välistä kartonki kulkee. (Sepsilva 1997.)

### **3.6 Rullaus**

Rullauksessa kartonki rullataan tampereille helpommin käsiteltävään muotoon jälkikäsittelyä varten. Kiinnirullaimella saavutetaan katkoton rullaus, jolloin edellisen tampurin tullessa täyteen uusi tampurirauta tulee tilalle. Rullaaminen tapahtuu pope-nimisellä rullaimella, joka on yleisin käytössä oleva rullaintyyppi. (Sepsilva 1997.)

### **3.7 Jälkikäsittely**

Kartongin pintakäsittelymenetelmät voidaan jakaa pintaan siirtyvän aineen määrän ja pintakäsittelyaineen koostumuksen mukaan kolmeen menetelmään: pintaliimaus, pigmentointi ja päällystys. Tuotteen jälkikäsittely voidaan toteuttaa joko sen tekovaiheessa kartonkikoneessa tai erillisellä jälkikäsittelylinjastolla.

Pintaliimauksen tavoitteena on parantaa kartongin lujuusominaisuuksia. Menetelmää käytetään hienopapereille, päällystettävälle raakapapereille ja kartongeille. Päällystys tarkoituksena on parantaa tuotteen painettavuutta ja ulkonä-

köä. Päälylystyksessä kartonkiin lisätään joko toiselle tai molemmille puolille pigmenttiä sisältävä päälylystepasta. Kun pintaliimaan sekoitetaan täyteaineita, puhutaan tällöin pigmentoinnista. Pigmentointi vaikuttaa kartongin huokosiin täyttämällä ne päälylystyspastalla. Pigmentoinnissa käytetään myös liimapuristinta. (Knowpap 7.0 2005.) Kartonkikoneen 1 liimauspuristin sijoittuu kuivausryhmien 4 ja 5 väliin.

### **3.8 Vesijärjestelmät**

Kartonkikoneen vesijärjestelmät jakautuvat tuorevesijärjestelmään ja kiertovesijärjestelmään.

#### **Tuorevesijärjestelmä**

Tuorevesi on puhdistettua kartongin valmistuksessa käytettävää raakavettä. Tuorevesijärjestelmä sisältää vesiaseman, puhdistuksen, puskurivaraston ja veden pumppauksen sekä jakeluverkoston kulutuskohteisiin. Tuorevettä käytetään mm. suoraan prosessissa, kartonkikoneen suihkuvetenä, pumppujen tiivistevetenä, jäähdytysvetenä ja pesuvetenä. (Sepsilva 1997.)

#### **Kiertovesijärjestelmä**

Tehtaan kiertovesijärjestelmän tehtävänä on parantaa materiaalitaloutta ja pienentää ympäristökuormitusta. Kiertovesi muodostuu saostusvaiheessa erottuneesta vedestä sekä tuorevesijärjestelmän mukana tulleesta kuitupitoisesta vedestä. Kiertovesijärjestelmä jakautuu lyhyeen kiertoon ja pitkään kiertoon.

Lyhyessä kierrossa viiraosalla suodatautunut kuitupitoinen vesi kerätään viira-kaivoon. Konekyypistä pumpattavan sakea putkimassa laimennetaan viira-kaivon vedellä perälaatikon vaatimaan syöttösakeuteen. Fyysisesti lyhyt kierto sijoittuu perälaatikon ja massan annostelun välille.

Pitkällä kierrolla tarkoitetaan sitä osaa viiraosalla, mistä vettä suodattuu muualle kuin lyhytkiertojärjestelmään. Pitkäkiertoon tulee vettä myös massankäsittelyn muista vaiheista. Kierron vesi ohjataan kuitujen talteenoton kautta jäteveden puhdistukseen. (Sepsilva 1997.)

### **3.9 Hylkyjärjestelmä**

Hylky on kartonkia, joka on hyllytetty missä vaiheessa tahansa valmistusprosessia kartonginvalmistuksen ja jälkikäsittelyn aikana. Käsitelty hylky pyritään käyttämään kustannustehokkaasti uudelleen kartongin valmistusprosessissa. Hylkyjärjestelmän tehtävänä on muokata hylky sopivaksi raaka-aineeksi uudelleen käyttöä varten. (Knowpap 7.0 2005.)

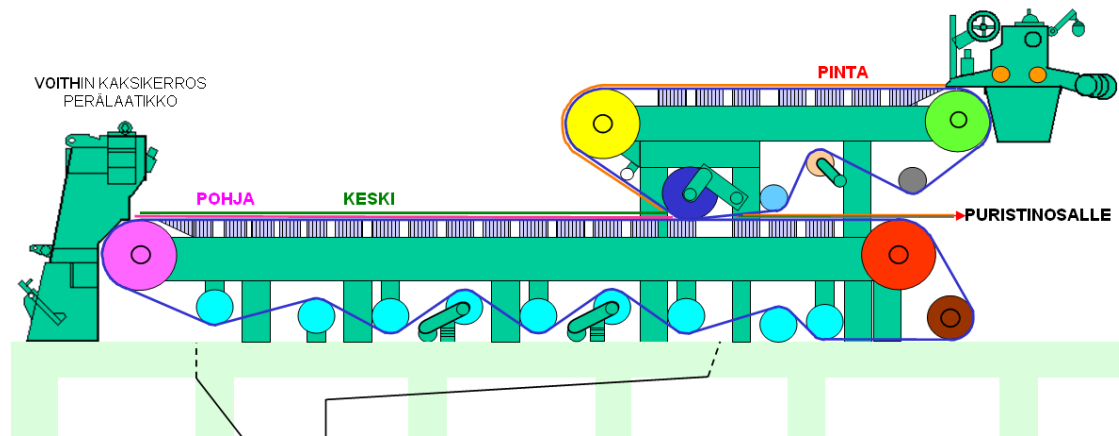
## **4 KARTONKIKONEEN KÄYTTÖJÄRJESTELMÄLLE ASETETTAVAT VAATIMUKSET KÄYTTÖJEN KANNALTA**

### **4.1 Kartonkikoneen rakenne**

Paperi- ja kartonkikoneissa käytetään runsaasti suuria sylintereitä, joita pyöritetään miltei samalla pintanopeudella. Jotkin sylinterit on kytketty mekaanisella voimansiirrolla yhteen suuremmiksi ryhmiksi, kuten suuren hitausmomentin omaavat kuivausryhmät. Kuivausryhmissä telojen ympärillä on niitä sitomassa viirat, ja puristinosalla teloja sitovat puristinhuovat. Jotkin pienemmät telat, kuten ohjaustelat, voivat olla käyttöryhmään sidottuja vain päänvientiköyden avulla. (Arjas 1983.)

#### **4.1.1 Viiraosa**

Tavallisesti viiraryhmä on koneen johtava käyttöryhmä, joka toimii koneen nopeuden asettajana muille käytöille. Kartongin neliömassan määrää viiran nopeuden ja perälaatikon massasuihkun nopeuden suhde, joten oikean nopeuden pysyvyys on tärkeä. Tavallisesti viiraryhmän käytön perässä olevia teloja ovat vetotela ja imutela sekä palautustelat. Erikseen käytettyjä teloja viiraosalla ovat vetotela, imutela, rintatela, palautustelat sekä mahdollinen viirarulla. Vetotelan moottori toimii ryhmän päämoottorina ja määrää muiden telojen kuormitusta suhteessa vetotelan kuormitukseen. (Arjas 1983.)

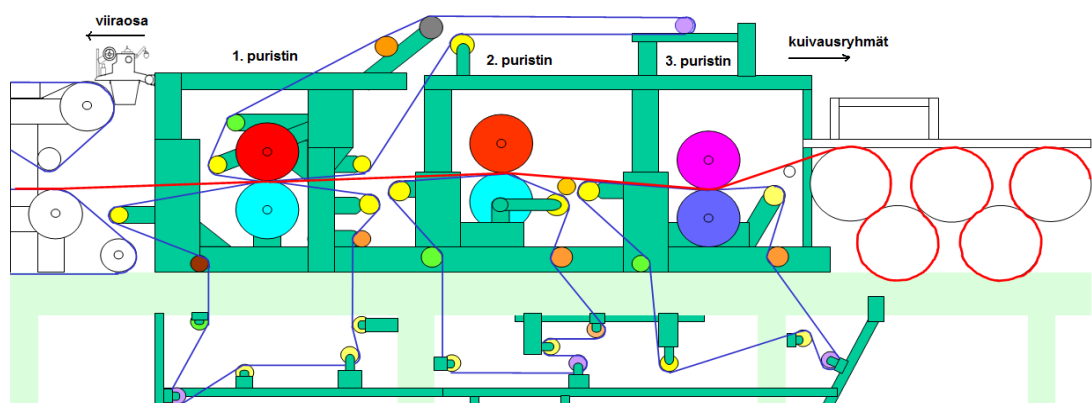


Kuva 4.1 KA1 viiraosa ja perälaatikot (Imatramills)

#### 4.1.2 Puristinosa

Puristimet ja huovat muodostavat yhdessä kokonaisuuksia monine apumootoreineen. Puristimien nippien kiinniohjauksessa on puristimen molemmilla teloilla oltava sama kehänopeus, muuten puristinhuovat voivat repeytyä. Vaaratilanteilta välttyään kiinniohjattavien telojen käyttöjen tarpeellisilla lukituksilla. Kiinniohjatukset vaikuttavat paljolti koko ryhmän toimintaan.

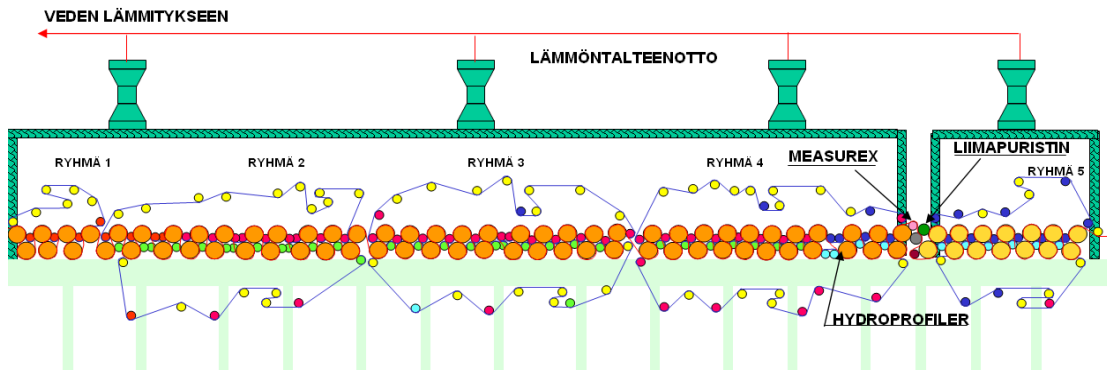
Puristinosalle ominaisia käyttöjärjestelmän kannalta ovat toisiaan vasten puristuvat telat, jotka vaativat suuria käyttötehoja. Usein puristinnipissä vaaditaan molemmille teloille oma tehonsyöttö, ettei tehoa jouduta siirtämään nipin välityksellä telasta toiseen. Puristinnipissä tela on liikkuva ja tällöin tarvitaan käytön ja telan välille nivelakseli ja tarvittava liikkumavara. Puristinhuovilla on tavallisesti huovanjohtoteloja, joilla on omat käytöt. (Arjas 1983.)



Kuva 4.2 KA1 puristinosa (Imatramills)

### 4.1.3 Kuivatusosa

Kuivatusosa käsittää useita erillisiä käyttöryhmiä, joissa on mekaanisesti toisiinsa kytkettyjä kuivaussylintereitä. Tavallisesti kuivausryhmässä on vain yksi moottori pyörittämässä ryhmän kuivaussylintereitä ja muutamia mahdollisia pieniä apumoottoreita levitystelojen tai kartonginohjaustelojen moottoreina. Kuivausryhmä asettaa sähkökäytölle raskaan kuorman kiihdytettäessä ja jarrutettaessa suuresta hitausmomentista johtuen. Näin ollen moottorin koko määräytyy pitkälti sallittujen kiihdytys- ja hidastusaikojen mukaan. Käyttöteho moottoreilla on verraten pieni pyöritettäviin massoihin nähden. Vanhoilla koneilla, kuten Karttonkikoneella 1, käytetään ryhmäkohtaisia mekaanisia jarruja vauhdin pysäyttämiseen. (Arjas 1983)

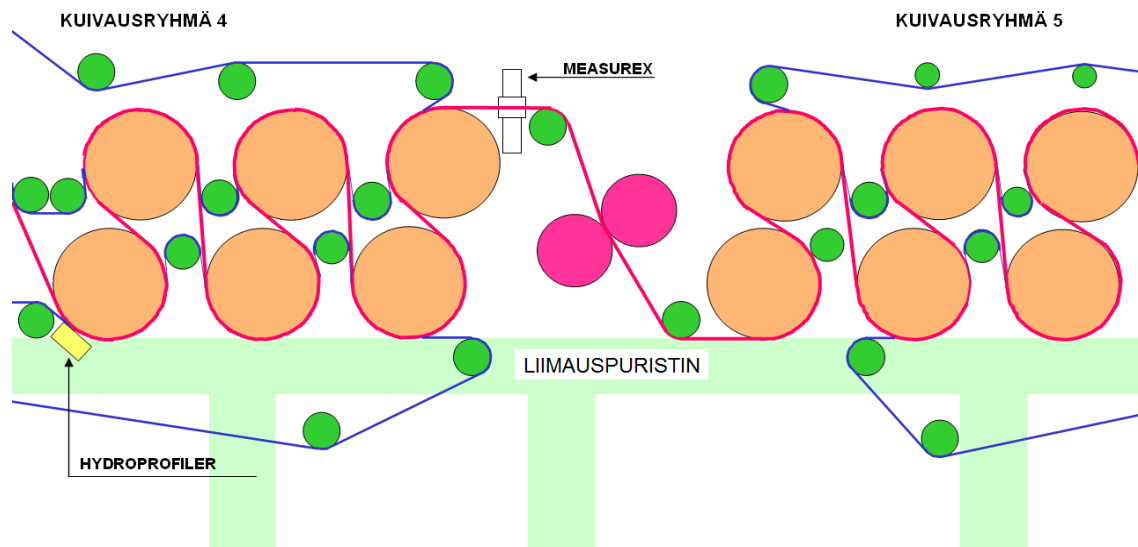


Kuva 4.3 KA1 kuivatusosa (Imatramills)

### 4.1.4 Liimapuristin, välipuristin, kiillotuskalanteri

Puristimille ja kalantereille on ominaista, että ne on voitava avata ja puristaa yhteen vauhdissa radan ollessa päällä. Nipissä puristimen molemmat telat tarvitsevat oman käytön, joilla telojen pintanopeudet saadaan säädettyä samaksi. Nipin ollessa kiinni telojen kuormitussuhteita on voitava säätää.

Liimauspuristimessa kartonkirata venyy ja kostuu, jonka seurauksena liimauspuristimen ja seuraavan kuivausryhmän ohjaus on vaikeaa. Tilanteessa käytetään tavallisesti kireyden säätöä, joka ohjaa liimauspuristimen jälkeistä kuivausryhmää ja joka pystyy automaattisesti pitämään haluttuna radan vakio-kireyden ja nopeuseron tuntien radan venymisen kostutushetkellä. (Arjas 1983.)



Kuva 4.4 KA1 liimauspuristin (Imatramills)

Kuvassa 4.4 on näytetty kalanterin ympäristössä sijaitsevia radan mittalaitteita. Measurex-prosessitietokoneella mitataan kartongin neliöpainoa, kosteutta, paksuutta ja kuivapainoa ennen liimauspuristinta. Hydroprofilerilla säädetään kosteusprofiilia. Laitteet ovat myös esitetty kuvassa 4.5.

#### 4.1.5 Konekalanterit

Konekalanterin käyttöön kuuluu päämoottori ja muutama kartongin ohjaus- tai levitystela. Konekalanterointi on kartonkikoneen toiseksi viimeinen ryhmä heti kuivatuksen jälkeen. Konekalanteri on tavallisesti varustettu kireydensäädöllä, jotta puolan vaihdon yhteydessä tapahtuvat kireysvaihtelut eivät vaikuttaisi edeltävien kuivausryhmien toimintaan.

Kartonkirata kulkee yhden tai useamman nipin läpi, jotka muodostuvat valurauta- tai terästeloista. On tyypillistä, että konekalanteroinnissa suurta alatelaa vasten painaa yksi tai useampi säädettävällä kuormituksella oleva painotela. Kun halutaan ajaa rataa kalanterin läpi nipin ollessa auki, joudutaan varustamaan toinenkin alimmaisista teloista käytöllä. Konekalanterin molemmiin puoliin tavallisesti sijoitetaan paperinohjausteloja, joilla on omat telan sisäänrakennetut käyttömootorit.

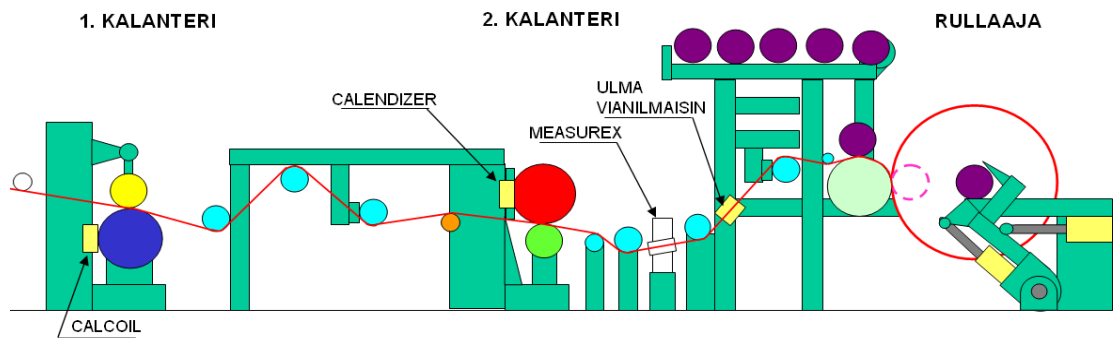
Konekalanteri pysäytetään tavallisesti kentänkäntöperiaatteella. Kalanterin liike-energia jarrutetaan sähköverkkoon DC- koneen kenttää heikentämällä. (Arjas 1983)

#### **4.1.6 Rullaimet**

Yleisin käytössä oleva rullaintyyppi on ns. pope-rullain, jossa syntyvää konerullaa painetaan vakionopeudella pyörivää, käytöllä varustettua sylinteriä vasten. Nopeilla koneilla käytetään kiihdytyskäyttöä tampureille, jossa ne kiihdytetään suunnilleen ratanopeuteen helpottaen tampuriraudan vaihtoa. Kartonkikoneella 1 käytetään pope-rullainta.

Hyvän rullaustuloksen saamiseksi ratakireys pyritään pitämään tasaisena kireydensäädön avulla. Käyttö on varustettu automaattisella kireydenvalvonnalla. Automaattiikka hoitaa oikean kireyden rullaimessa pitämällä rullaimen nopeuden hiukan ratanopeutta korkeampana. Tavallisesti kireydensäätö korvataan kireyteen verrannollisella virtasäädöllä. Tällöin vakiovirta vastaa vakiokireyttä.

Rullaimessa valmiin rullan halkaisija suurenee koko ajan rullan maksimikokoon asti. Rullan suuretessa muuttuu koneen vääntömomentin vipuvarren pituus (säde) jatkuvasti, ja siksi moottorin momenttia on pienennettävä. Rullaimen säätö rakennetaan siten, että sähkökentän ja rullan säteen suhde pidetään vakiona. Tavallisesti rullan säde vaihtelee verraten paljon, joten koko aluetta ei voida hyödyntää kentän ja säteen suhdetta käyttäen. Pienillä säteen arvoilla pidetään virran ja säteen suhde vakiona kentän arvon ollessa minimiarvossaan. Säättöpa vaatii jatkuvaa rullan säteen mittaamista. Säteen mittausravojen mukaan ohjataan sitten koneen ankkurivirtaa ja moottorin kenttää. (Arjas 1983.)



Kuva 4.5 KA1 kalanterit ja rullain (Imatramills)

Kuvassa 4.5 on näytetty kalanterin ympäristössä sijaitsevia radan mittalaitteita. Ulma 3D -vianilmaisin havaitsee liikkuvasta kartonkiradasta reiät, täplät, päällystysviirut, ym. viat. Calcoil säätelee profiilin paksuutta.

#### 4.1.7 Päällystinyksiköt

Paperi- ja kartonkikoneissa tuotetta jalostettaessa koneeseen sijoitetaan erilaisia päällystimiä. Päällystimiä käytettäessä rata voi muuttua kastuessaan tai kuivuessaan. Kastuessaan rata venyy ja kuivuessaan kutistuu. Tällaisissa tapauksissa radan kireydensäätö on välttämätön säätömuoto pitämään ratakireyttä vakiona. (Arjas 1983.)

#### 4.1.8 Sekoituspumppu

Sekoituspumpun moottorin käyttö on periaatteessa samanlainen kuin koneen ryhmäkäyttö. Säätonä sekoituskoneessa on nopeudensäätö, johon usein on lisättyä perälaatikon pinnankorkeuden ja paineen ulkoinen säätöpiiri pitämään arvot vakiona. Näin varmistutaan, että massavuo viiralle pysyy vakiona.

Ennen massan virtausta perälaatikkoon säädeltiin perinteisellä kuristusventtiilillä pumpun paineen pysyessä vakiona. Kehityksen mukana tuomat tyristorisillalla ohjatut tasavirtamoottorit ovat mahdollistaneet moottorin pyörintänopeuden säädön, ja epäedullinen kuristussäätö on jäänyt taka-alalle. Nykyisin uudet muuttajakäyttöiset oikosulkumoottorit ovat kuitenkin jo syrjäyttäneet tasasähkökoneet uusittavissa kohteissa. (Arjas 1983.)



## 4.2 Kartonkikoneen säätöjärjestelmät

Kartonkikone on jaoteltu käyttötekniillisesti ryhmiin, joiden nopeutta voidaan toisiinsa nähden tietyissä rajoissa säätää.

Perussäätönä kartonkikoneissa on nopeudensäätö, jossa säädettävän kohteen nopeus mitataan tavallisesti pyörimisnopeutena takometreillä. Monimoottorikäyttöillä perusryhmänä on viira, jonka nopeus pyritään pitämään vakiona. Valta-akselikäytöissä on perinteisesti käytetty kiinteänä ryhmänä 1. kuivausryhmää, jonka nopeuden määrää valta-akselin nopeus välityssuhteen ollessa kiinteä. Radan kulkua säädellään säätämällä muiden ryhmien nopeutta perusryhmään verrattuna.

Monimoottorikäytössä on useita pisteitä, joihin jokaiseen liitetään moottori. Tällä tavoin vältetään mekaanisien voimavälityslaitteiden käytöltä. Moottorit jaetaan käyttöryhmiin siten, että kaikki ne moottorit, joiden käyttämien telojen kehänopeuksien pitää olla yhtä suuret, muodostavat yhden käyttöryhmän. Useiden moottoreiden käyttöryhmistä voidaan mainita mm. viiraryhmä (yhteinen viira) ja puristinosa (yhteinen huopa). Kahden käyttöryhmän välinen nopeusero on oltava aseteltavissa, sillä yleensä radan ominaisuudet muuttuvat sen kulkusuunnassa. Muutokset ovat yleensä radan venymistä ja kutistumista sen kastumisesta ja kuivumisesta johtuen.

Määrättyjen ryhmien välistä nopeuseroa säädettäessä monimoottorikäytössä muuttuvat jäljempänä olevien ryhmien nopeudet niin, että ryhmien väliset suhteelliset nopeuserot pysyvät muuttumattomana, vakiona. Näin voidaan säätää vain yhtä ryhmäväliä kerrallaan. Valta-akselikäytössä tilanne on erilainen. Siinä joudutaan tavallisesti säätämään kaikki perusryhmästä poispäin sijaitsevat ryhmävälit.

Koneen nopeus on eräs kartongin neliömassaan vaikuttavista tekijöistä. Nopeuden säädössä tarkkuudeksi vaaditaan 0,05 – 0,10 % koneen suurimmasta nopeudesta. Käytännössä koneen nopeusvaihtelulla ei ole merkitystä neliömassavaihteluun, vaan sen tuovat mukanaan muut laatutekijät. Hitailla, paksua kartonkia tuottavilla koneilla nopeuden vaihtelu ei johda ratakatkoon yhtä herkästi kuin nopeilla koneilla. Näin ollen hitaiden koneiden nopeussäädöltä ei vaadita

yhtä suurta tarkkuutta. Valta-akselikäyttöisten koneiden säätötarkkuus on noin prosentin luokkaa.

Kartonkikoneen kuivassa päässä voidaan ryhmävälin säädössä käyttää myös virtasäätöä, jolla ryhmän käyttömoottorin vääntömomentti pidetään vakiona ja nopeus saa vaihdella radan venymisen mukaan. Pope-rullaimessa tavallisesti käytetään nopeuden säätöä. Ratakireys pysyy vakiona, jos ryhmän kuormitus muodostuu pääasiassa radan kireydestä. Konerullan vaihdossa tulee kuormitusvaihteluita ja kireyteen tulee häiriöitä. Tällöin on tarvittaessa siirryttävä samanlaiseen nopeuden säätöön, kuin päänniennissä. Kireyssäädön ja virtasäädön tarkkuudelle ei tarvitse asettaa kovinkaan suurta tarkkuutta, sillä tehtävästä johtuen yleisesti sallitaan vielä 10 %:n vaihtelu. (Arjas 1983.)

### **4.3 Käyttökoneiston mitoittamiseen vaikuttavat tekijät**

Kartonkikoneen ryhmien vääntömomentin tarve kasvaa verraten vähän ryhmän pyörimisnopeuden kasvaessa. Pumppukäytössä moottorilta vaadittava vääntömomentti kasvaa pumpun pyörimisnopeuden neliössä. Momentin muuttuminen pyörimisnopeuden muuttuessa on otettava huomioon käyttöjen mitoituksessa. Käynnistysvääntömomentti voi olla määräävä tekijä suurilla hitausmassoilla olevilla käytöillä kuten kartonkikoneen puristinosilla.

Massahitausmomentti on toinen huomioon otettava tekijä, joka tulee koneiden mitoittamisessa eteen. Hitausmomentin kiihdytys tai jarrutus saattaa määrätä käytön mitoituksen kartonkikoneilla mm. kuivausryhmillä. Poikkeukselliset kuormitukset tulee selvittää tapauskohtaisesti, kuten esimerkiksi kartonkikoneen kuivausosalla kuivaussylinterit, joihin mahdollisesti kertyvä lauhde muuttaa kuormitusta.

Käyttömoottorin ja kuormituksen välissä ei saa olla haitallista välystä tai joustavuutta. Kartonkikoneilla käytöillä käytetään välyksen pienentämiseksi hammas-kytkimiä. Käyttömoottorin ja kuormituksen välinen välys on haitaksi ryhmän nopeudensäädöille. Liian suuret välykset aiheuttavat liiallista säätöjen värähtelyä. Kun käyttömoottorin ja ryhmän välinen akseli on riittävän jäykkä, nopeussäätöjen tekeminen helpottuu ja pysytään värähtelyn osalta annetuissa rajoissa paremmin.

On harvinaista, että moottorin pyörimisnopeus saadaan sopimaan suoraan käyttöön ilman nopeusmuutoksia. Tällöin kuormituksen ja moottorin välillä joudutaan käyttämään vaihdetta. Moottorin akselille redusoitu kuormitusvääntömomentti muuttuu suoraan verrannollisena välityssuhteeseen ja massahitausmomentti muuttuu verrannollisena välityssuhteen neliöön. Käytettäessä taa-juusmuuttajaohjattuja moottoreita, on mahdollista jättää vaihteet pois käytöiltä tilanteissa, joissa moottorin momentti riittää käytölle.

Käyttöryhmien ollessa raskaita, joudutaan käyttömoottori mitoittamaan astetta suuremmaksi, kuin mitä kuormitusvääntömomentti edellyttäisi tarvittavan säätönopeuden saavuttamiseksi. (Arjas 1983.)

#### **4.4 Ympäristöolosuhteet käyttöjen kannalta**

Käyttöjen sijoittelulla voidaan suojella niitä mekaanisilta vaurioilta. Käyttöjä ei esimerkiksi tulisi sijoittaa trukliväylien varrelle, jossa ne ovat vaarassa vahingoittua mekaanisesti. Samoin on otettava huomioon kanssa millä lailla käytöt joutuvat olemaan kosketuksissa veden, massan, pölyn tai miten kaasut vaikuttavat koneeseen sekä miten pystytään järjestämään käytössä syntyvän lämmön poistuminen koneesta. Laitteiden sijoittelussa ja suojauksessa tulee ottaa em. seikat huomioon. (Arjas 1983.)

#### **4.5 Käytön ohjaus- ja valvontalaitteet**

Paperiteollisuudessa paperi- ja kartonkikoneilla koneen käyttöjen ohjauksessa käytetään vielä jonkin verran perinteisiä ohjauskytkimiä ja mekaanisia releitä. Relelogiikkaa ovat korvanneet ohjelmoitavat logiikkajärjestelmät yleisesti ja tuoneet mukanaan muutoksia prosessin ohjaukseen. Logiikkaohjauksen ansiosta lukituksia pystyy muuttamaan ja raportointi- ja hälytyspalveluiden saanti on yksinkertaista. Ennen nämä palvelut olivat vaikeita tuoda käyttäjän saataville silloisella tekniikalla.

Mittareina käytettävät digitaaliset mittarit ovat syrjäyttäneet perinteiset analogiset mittarit. On tosin olemassa vielä kohteita, joissa ei ole järkevää käyttää digitaalista osoitinta. Lukemataarkkuus on digitaalisissa mittareissa parempi analogi-

siin mittareihin verrattuna. Digitaaliset mittarit saadaan tehtyä hyvin mekaanista räsistusta kestäviksi ilman herkkiä liikkuvia osia, joita analogiamittarit sisältävät.

Digitaalinen tietokonesäätö vaatii laiteteknisesti ohjaukselta erikoisratkaisuja. Esimerkiksi kun käytön nopeutta halutaan muuttaa, sitä pitää pystyä muuttamaan käsin ja tietokoneohjatusti automatiikalla. Kartonkikoneilla on nopeuksien ja nopeuserojen havainnointiin ja tallennuksiin mittaussjärjestelmiä, josta suureet voidaan liittää prosessitietokoneen laskettaviksi. Yhä enemmän määrin laitteiden mittaustietoja liitetään tietokonejärjestelmiin, jossa mittaustietoja käytetään hyväksi koneen säätöä ajettaessa optimaalisiksi. (Arjas 1983.)

#### **4.6 Sähkökäyttöjen kunnossapito**

Sähkömoottorikalustoa hankittaessa tulee miettiä koneen aiheuttamia kustannuksia mm. kunnossapidon kannalta. Osa moottorityypeistä, kuten tasavirtamoottori, vaatii huoltoa tietyn väliajoin, ja se tuo mukanaan materiaalikustannuksia sekä työvoimakustannuksia. Toisentyyppiset moottorit, kuten vaihtovirtakoneet tai kestopagnetoidut tahtikoneet, eivät tarvitse säännöllistä mekaanista huoltoa. Niille riittää ulkopuolinen puhtaanapito ja laakereiden kunnon tarkkailu.

Kartonkikoneen 1 tasavirtamoottoreita huolletaan suunnitelluissa seisokeissa ennakkohuolto-ohjelman mukaisesti. Seisokkeja on suunnitellusti noin viiden viikon välein, ja niissä tasavirtamoottoreille tehdään asianmukainen hiilihuolto. Moottorit avataan, vaihdetaan kuluneita hiiliharjoja uusiin, puhdistetaan moottori hiilipölystä paineilmalla, varmistetaan hiiliharjojen liikkuvuus niiden pitimissä, tarkistetaan kommutaattorin pinta ja koneen yleinen kunto. Nämä ovat normaaleita toimenpiteitä jokaisen moottorin osalla.

On pyrittävä pitämään laitekanta sellaisena, että käytössä on mahdollisimman vähän erilaisia moottorityyppejä. Tällöin on mahdollista löytää jokaiselle moottorille varamoottori paljon helpommin pitämättä suurta varastoa vaihtokoneista. Suurien ja kalliiden koneiden hajoamisen varalle ei ole järkevää pitää uusia koneita varastossa, vaan edullisempia varaosia. Pienempiä koneita kannattaa pitää varastossa kutakin käytössä olevaa konetyyppiä, jolloin rikkoutuneen koneen voi vaihtaa nopeasti. Sama jako pätee myös moottoreiden ohjaus- ja syöttölaitteistossa. (Arjas 1983.)

## 5 KÄYTTÖJEN TEKNIKKAA

### 5.1 Mekaaninen osuus

#### 5.1.1 Valta-akseli

Valta-akselikäytöt olivat aluksi hihnakäyttöisiä paralleelikäyttöjä, joissa käytettiin tyypillisesti pääakseleiden suuntaisia väliakseleita. Käytön nopeutta säädettiin kartiomallisilla hihnapyörillä siirtämällä hihnan kulkukohtaa hihnapyörällä.

Paralleelikäytön jälkeen tuli kehittyneempi Marshallin käyttö, jollainen on Imatalla kartonkikoneella 1. Käyttö on koneen suuntainen sen sivulla ja koneen käytön akselit ovat kohtisuorassa valta-akseliin nähden. Valta-akselilta otetaan teho käyttökohteeseen säädettävällä hihnävälityksellä ja kartiohammas- tai kierukkavaihteilla. Marshallin valta-akseli on sijoitettu konetason alapuolelle, jolloin akseliväli on riittävän pitkä. Hihnaa ohjataan kartiopyörillä poikittaissuunnassa ruuvien avulla siirrettävällä haarukalla, jonka muodostavat kaksi kuulalaakeroitua rullaa.

Valta-akseli pyörii moottorin määräämää 500 r/min ja on pituudeltaan käsin mitattuna noin 85 m ja halkaisijaltaan noin 125 mm. Akseli muodostuu pienemmistä palasista (12 kpl), jotka on liitetty yhteen ns. hammasliittimillä. Tällöin huollon yhteydessä akseli on helpompi katkaista halutusta kohdasta huoltotöiden helpottamiseksi. Akselilla on kannatinlaakerit tietyn matkan välein, ja akselilla on kartiopyörät käyttöjen kohdalla, josta teho välitetään hihnalla ylös konetasolle. Kartiopyörät ovat halkaisijaltaan noin metrin.

Kuivausryhmien kaikki viisi käyttöä ovat kuvien 5.1 ja 5.2 mukaisesti rakennettuja käyttöjä. Puristinosan käytöt ovat näöltään hiukan erilaisia johtuen käyttöjen sijoittelusta, mutta periaatteeltaan ovat samanlaisia käyttöjä. Kuvassa 5.1 nähdään Marshallin järjestelmän konetasolla (yläpuolinen) sijaitseva osuus ja kuvassa 5.2 järjestelmän konetason alapuolella sijaitseva itse valta-akselin osuus.

Käytön nopeutta voidaan hienosäätää hihnan paikkaa siirtämällä poikittaissuunnassa rullilla. (Arjas 1983.)



Kuva 5.1 Marshallin järjestelmän käytön konetasolla sijaitseva osa

Kuvassa 5.1 nähdään vasemmalta oikealle ryhmän jarru, vaihde, kytkin ja hihnavälityksen yläpuolinen osa sekä hihnan ohjainrullat. Oikealla on lisäksi kannatinlaakerointi ja pulssianturi.

Valta-akselin käyttöryhmillä on ryhmäkohtaiset mekaaniset jarrut. Tekniikka on energiaa hukkaavaa, koska jarrutuksessa syntyvä jarrutusenergia muuttuu lämmöksi ja haihtuu ilmaan. Uudemmissa sovelluksissa on jarrutus toteutettu paremmin mm. verkkoon jarrutuksella, jolloin jarrutuksessa generoitu energia voidaan palauttaa takaisin sähköverkkoon. Suurta hyötyä verkkoon jarrutuksella ei saada, koska jarrutustilanteita on melko harvoin ja jarrutusaika on lyhyt. Verkkoon jarrutus on kuitenkin järkevämpi vaihtoehto kuin vanha energiaa hukkaava vaihtoehto.

Käyttöjen vaihteet ovat perinteisiä hammasvaihdetekniikalla toteutettuja kulma- vaihteita. Vaihteet ovat fyysiseltä kooltaan suuria ja välittävät suurta momenttia.

Käytön kytkimet ovat periaatteessa kuvan 5.9 mukaisesti pneumaattisesti toimivia kytkimiä, mutta rakenteeltaan hiukan erityyppisiä. Kytkimet ovat myös energiaa hukkaavia laitteita käytön mekaanisissa osissa. Kytöntä kiinni ajettaessa

kytkin luistaa jonkin verran, ettei hetkellisesti aiheudu liian suurta mekaanista kuormitusta käytön laitteille.

Konetasolla sijaitseva kartiopyörä ottaa hihnan tuoman energian vastaan ja välittää sen kytkimen kautta vaihteelle. Kartiopyörä on nimensä mukaan valmistettu kartion muotoon, jolloin välitystä voidaan kartiopyörien välillä muuttaa hihnan paikkaa siirtämällä sivusuunnassa.

Kartiopyörien välillä pyörivä hihna on lattamallinen nahkainen hihna. Hihnan leveys määräytyy välitettävän tehon mukaan (n. 150 – 200 mm). Hihnan kulumiseen vaikuttaa johdettu teho, kartiopyörien kartiokkuus ja hihnan reunojen hinkkautuminen ohjainrulliin. Hihnan käyttöikä on käytöstä riippuen yli vuoden.

Hihnan ohjainlaitteessa hihna kulkee ohjainrullien välissä. Hihnaa ohjataan poikittaissuunnassa ruuvilla, jolloin rullat ohjaavat hihnaa käyttäjän määräämään suuntaan

Käytön nopeutta vaihdetaan digitaalisella pulssianturilla. Ryhmien nopeustietojen perusteella voidaan säätää mm. ryhmien välisiä nopeuseroja halutuksi.



Kuva 5.2 Marshallin järjestelmän käytön konetason alapuolella sijaitseva osuus



Edellisen sivun kuvassa 5.2 on kuivausryhmän käyttö kuvattuna konetason alapuolella. Kuvassa näkyy hihnäkäytön alapuolinen osuus, kytkin ja muutama kannatinlaakeri omilla perustuksillaan.

Kartiopyörien suuri kartiokkuus rasittaa hihnaa ja pienentää sen käyttöikää. Kartiopyörien kohdilla hihnaan muodostuu erilaisia rasittavia voimia. Kartiopyörän suuremman läpimitan puoleinen reuna etenee suuremmalla kehänopeudella kuin vastakkainen reuna, mutta vastakkaisella kartiopyörällä tilanne vaihtuu päinvastaiseksi. Kierroksen aikana molemmat hihnan reunat ovat kulkeneet kuitenkin saman matkan. Hihnaa ei voida rasittaa liikaa sen ominaisuuksien takia. Yleensä nopeuden rajoitus muodostuu nopeuden neliöön verrannollisena olevasta keskipakovoimasta pienentäen kosketuspainetta ja kitkavoimaa kartiopyörään. Tavallisimmin käytetyillä nahkahihnoilla päästään 25 m/s nopeuteen asti. (Arjas 1983.)

Kartiopyörillä kulkeva hihna hankaa ohjausrulliin ja kuluu reunoista. Ajan myötä hihnan reunat alkavat rispaantua, jolloin hihna joudutaan uusimaan. Rispaantumista edistävät kartiopyörien hihnaan aiheuttamat rasitukset.



Kuva 5.3 Kuivausryhmän ryömintäkäytön oikosulkumoottori ja vaihde



Konetasolla sijaitsevilla ryömintäkäyttöillä voidaan ajaa ryhmiä hyvin hitaalla nopeudella lyhyen tuotannonkatkon aikana. Käyttöillä laitetaan ryhmät alkuvauhtiin ennen valta-akselin käyttöjen kytkemistä.

Ryömintäkäytön moottorin nimellisteho  $P_n$  on 2,6 kW ja nimellisnopeus  $n_n$  on 750 r/min. Vaihteella moottorin nopeus pudotetaan käytölle suhteessa 180:1. Moottorin nimellismomentiksi muodostuu tietojen mukaan 33,1 Nm seuraavasti:

$$M_n = \frac{P_n}{2\pi \cdot n_n} = \frac{2600W}{2\pi \cdot \frac{750}{60s}} = 33,1 Nm \quad (5.1)$$

ja kuorman puolelle redusoituna vaihteen välityssuhteella saadaan suurempi momentti  $M'$  kaavan (4.2) mukaan.

$$M' = 180 \cdot M_n = 180 \cdot 33,1 Nm = 5960 Nm \quad (5.2)$$

Tällä tavoin pienellä 2.6 kW moottorilla saadaan suuri vääntömomentti kuorman puolella. Ryömintäkäytössä ryhmä pyörii nopeudella 4,2 r/min.

### 5.1.2 Vaihde

Vaihde tai vaihteisto on laite, jolla siirretään tehoa ja muunnetaan kierrosnopeuden ja momentin suhdetta. Vaihde voi olla kytkettynä moottoriin kytkimellä tai momentinmuuntimella. Vaihteita käytetään paperiteollisuudessa moottorin ja käyttökohteen välissä muuttamaan moottorin kierrosnopeus ja momentti käytölle sopivaksi. Varsinaisen vaihteiston lisäksi vaihteiksi voidaan laskea kaikki laitteet, jotka muuttavat momenttia ja kierrosnopeutta.

Valta-akselin käyttöjen vaihteet ovat alkuperäisiä kookkaita hammasvaihteita, joita ei voida hyödyntää käyttöjen saneerauksessa uudelleen. Saneerattaessa joudutaan hankkimaan tilanteeseen sopivat vaihderatkaisut vanhojen tilalle. Tilanne on jokseenkin samanlainen koneen muiden käyttöjen osalta. Nykyiset vaihteet eivät ole suoraan hyödynnettävissä suuremmalle ratanopeudelle. Vaihteiden välityksiä joudutaan muuttamaan, jotta käytön nopeus voidaan pitää sopivana optimaalisella moottorin vääntömomentin ja nopeuden arvolla. Tosin nykyaikaisilla moottoreiden syöttölaitteilla voidaan asettaa moottorin nimellistä vääntömomentti halutulle kierrosluvulle ja näin saada sopimaan vanhat vaihteet

käyttöille. Vaihteiden mitoitus ja tarve tulee määrittää uudelleen, kun käyttöille on valittu ensin moottorit ja moottoreille syöttölaitteistot. Valta-akselin ryömintäkäytöt poistetaan kokonaan saneerauksessa. Uudet käytöt mitoitetaan siten, että erillisiä ryömintäkäyttöjä omine vaihteineen ei enää tarvita.

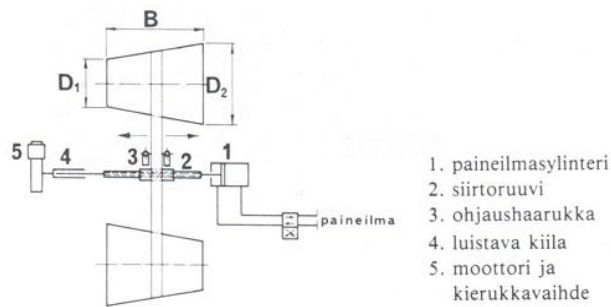


Kuva 5.4 1. kalanterin alatelan moottori ja vaihde

Nykyään tavallisimpia käytössä olevia vaihteistoratkaisuja ovat mm. kierukka-vaihde, hammasvaihde ja planeettavaihde. Liitteessä 6 on esitelty tarkemmin mainittujen vaihteistoratkaisujen ominaisuuksia.

Kartonkikoneiden käytöillä on välitysratkaisuina käytetty perinteisesti hihnäkäytöjä, differentiaalikäytöjä ja erillisiä planeettavaihteita.

*Hihnäkäyttöihin* luetaan laattahihnäkäytöt ja kiilahihnäkäytöt. Kartiopyöräkäytön hihnäpyörät on vastakkain asetettu ja hihnaa siirtämällä voidaan välitystä muuttaa. Hihnaa ohjataan siirtohaarukalla, joka muodostuu kahdesta rullasta. Kiilahihnäkäytön etuna on laattahihnäkäyttöön sen suurempi kitkavoima johtuen hihnan rakenteesta, kiilakulmasta. (Arjas 1983.)



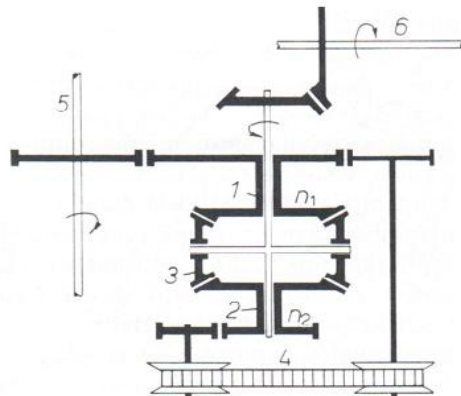
Kuva 5.5 Kartiohihnapyörästön rakennekuva (Arjas 1983)

Kartiopyöräkäytön laattahihnapyörät ovat vastakkain kartiomaisia, jolloin hihnaa siirtämällä poikittaissuunnassa voidaan ryhmän nopeutta säätää. Kuvan 5.5 käyttö on esitetty todellisuudessa kuvissa 5.1 ja 5.2 kuivausryhmien käyttöinä.

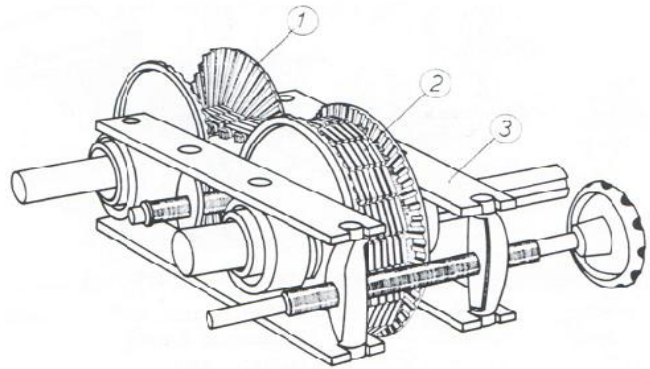
*Differentiaalikäyttöihin* kuuluu differentiaalivaihte ja PIV-variaattori.

Differentiaalimekanismin avulla saavutetaan tarkka säätö vain pientä osatehoa säätämällä, joka on tärkeää kartonkikoneen käyttöjen ominaisuuksien kannalta. Vaihte rakennetaan niin, että säätö tapahtuu käytön tarvittavan säätöalueen mukaan esim. 5-10 %:ia akselin nopeudesta. Vaihte on toteutettu useilla hammaspyörillä. Kuvan 5.6 mukaan vaihteesta ulostuleva kierrosluku muodostuu differentiaalipyörästön molemmilta puolilta syötettyjen kierroslukujen  $n_1$  ja  $n_2$  keskiarvosta.

PIV-variaattorissa hihnan tilalla on teräsketju. Variaattorin säätö tapahtuu liikuttamalla toisen lautaspyöräparin puoliskoja keskenään erilleen ja vastaavasti toisen puoliskon parit lähenevät. Säätö ja asetusnopeus ovat tarkkoja, mutta variaattori rajautuu vain pienitehoisiin käyttöihin. (Arjas 1983.)



1—3 differentiaalipyörästä 4. variaattori  
5. valta-akseli 6. käytetty akseli.

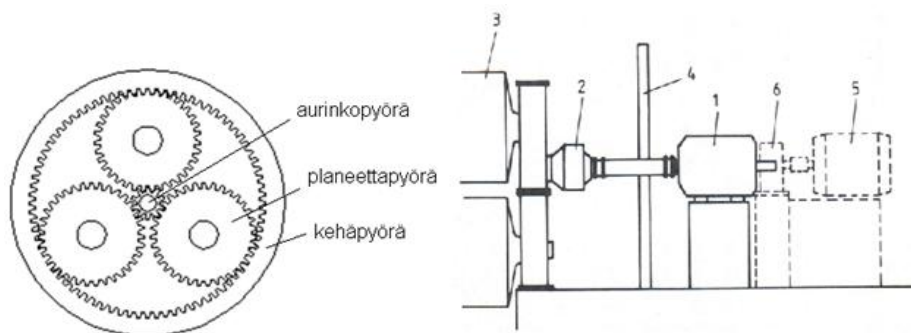


1. uritetut lautaspyörät 2. teräslamelliketju  
3. säätömekanismi

Kuva 5.6 Differentiaalivaihteen kaaviokuva ja PIV-variaattori (Arjas 1983)

*Planeettavaihteet* ovat rakenteeltaan kompakteja. Vaihteen läpi siirrettävä momentti jakautuu useille planeettapyörille, jolloin hammasrattaille jakautuu pienempi paine kuin jos momentti siirrettäisiin yhden kosketuspinnan kautta. Tämän vuoksi planeettavaihteella voidaan välittää suuri vääntö sen kokoon nähden. (Arjas 1983; Puranen 2002.)

Vaihteen asennus voidaan tehdä suoraan koneen runkoon ja tarpeen mukaan liittää kiertoöljyvoitelun piiriin. Vaihdetta käytetään yleisesti kartonkikoneissa.



Kuva 5.7 Planeettavaihteiston rakennekuva ja vaihteen käyttösovellus kartonkikoneen kuivatusosalle asennettuna (Arjas 1983)

Kuvassa 5.7 esiintyvät seuraavat merkinnät: 1) moottori, 2) planeettavaihte, 3) kuivaussylinterit, 4) huuvan seinä, 5) moottori tavanomaisine hammasvaihteineen (6).

## Välityssuhde

Vaihteella on tietty välityssuhde. Vaihteen suurella välitysarvolla saadaan pienellä kierrosnopeudella suuri momentti ja pienellä välitysarvolla vastaavasti saadaan suurella pyörimisnopeudella pieni momentti. Vaihteelta saatavaan momentin suuruuteen vaikuttaa moottorilta saatava teho kyseisellä kierrosnopeudella.

Vaihteen välityssuhde on käyttävän akselin pyörimisnopeuden ja käytettävän akselin pyörimisnopeuden osamäärä. Tavallisesti kartonkikoneen käyttöillä vaihteistot kasvattavat momenttia ja pienentävät pyörimisnopeutta. Näin ollen vaihteiston välityssuhde on yhtä suurempi. (VTT 2005.)

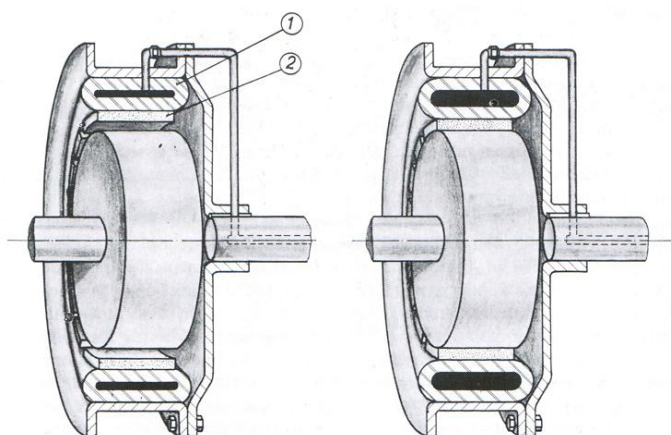
Kartonkikoneessa vaihteiden välityssuhteen muodostumiseen vaikuttaa suoraan haluttu ratanopeus, telan (sylinterin) halkaisija ja moottorin akselinopeus mitoitusarvoilla. Esim. ryömintäkäyttöjen vaihteiden välityssuhde on 180:1 ja valta-akselikäyttöjen kuivausryhmien sekä puristinkäyttöjen välityssuhde on 5:1.

### 5.1.3 Kytkin

Kytkin mahdollistaa pyörivään akseliin perustuvan voimansiirron keskeyttämisen.

Kartonkikoneen käynnistyessä käyttöjen moottoreiden on luovutettava suuri määrä energiaa pyörivien massojen kiihdyttämiseen. Kiihdytykseen on varattava tarpeeksi aikaa, jotta vääntömomentti ei nouse liian suureksi käynnistyksen aikana. Esimerkiksi hammasvaihde sietää ajoittaisen vain 50 %:n ylikuormituksen.

Kartonkikoneen kiihdytysaika on 2-4 min seisonnasta täyteen nopeuteen. Yleensä koko konetta ei tarvitse pysäyttää tai käynnistää samalla kertaa. Esimerkiksi valta-akselilla olevat kuivausryhmät voidaan käynnistää luistavan kytkimen avulla, jolloin jokaisessa ryhmässä on oma kitkakytkin. Seuraava kuva 5.9 esittää paineilmalla toimivaa kitkakytkintä, jonka tyyppistä rakennetta on käytetty paljon.

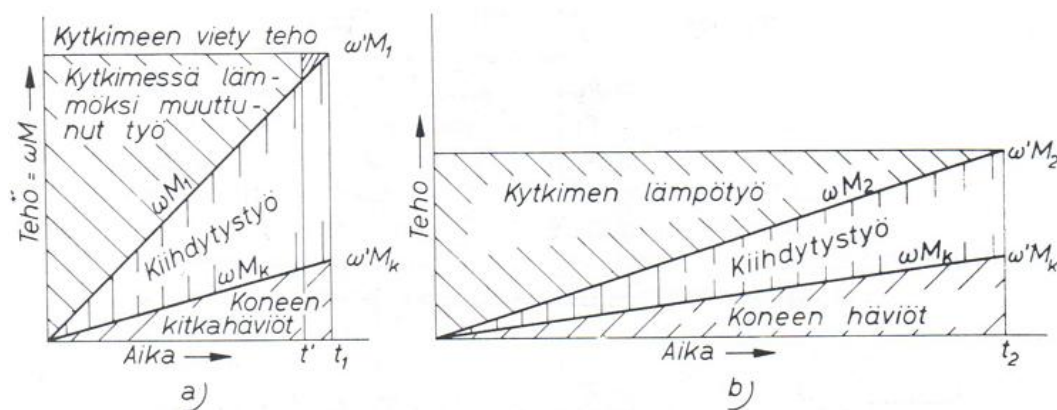


Kuva 5.8 Periaatteellinen toteutus paineilmatoimisesta kytkimestä (Arjas 1983)

Kuvassa 5.8 kytkin on paineilmatoiminen. Rumpityyppinen kitkakytkin on avattuna vasemmalla ja suljettuna oikealla. Kuvassa 5.8 merkinnät 1) osoittaa paineilmaletkua ja 2) kitkakehää.

Kitkakytkintä käytettäessä tehoa ja sen myötä energiaa menee hukkaan. Kytkimen kiinnilaiton alussa tehosta pääosa menee kitkakyöhön ja pieni osa käyttöryhmän kiihdyttämiseen. Tehon siirto lineaarisesti käytön kiihdyttämiseen vastaavasti pienentää kytkimen luistamista ja tehohäviöitä.

Kun käytön kiihdyttämiseen käytetty energia kasvaa lineaarisesti ajan myötä ja kitkakytkimeen tuhlautunut energia pienenee vastaavasti, voidaan esittää tapahtuma aika-tehokoordinaatistossa seuraavasti.



Kuva 5.9 Kitkakytkimessä tapahtuva hyöty- ja hukkatyö (Arjas 1983)

Kuvassa 5.9 vasemmanpuolisessa kuviossa a) käynnistysmomentin suuruus  $M_1$  on suurempi kuin oikeanpuoleisessa kuviossa b), jonka käynnistysmomentin

suuruus on  $M_2$ . Pienemmällä käynnistysmomentilla ottotehosta menee enemmän lämmön tuottamiseen kuin suuremmalla momentilla. Lämmöksi muuttuva kitkatyön osuus kasvaa, kun käynnistysmomenttia pienennetään  $M_1 \rightarrow M_2$ .

## **5.2 Sähköteknilinen osuus**

### **5.2.1 Valta-akselin moottorikäyttö**

Valta-akselia pyörittää Westinghousen tekemä 938 kW:n tasasähkömoottori, sivuvirtakone. Koneen käyttöjännite on 600 V, nimellisvirta on 1640 A ja nimellinen pyörimisnopeus on 500 r/min. Koneen nimellinen magnetointijännite on 250 V ja magnetointivirta 14,75 A. Moottori on valmistettu vuonna 1950 ja asennettu Imatralla pyörittämään valta-akselia vuonna 1993.

Valta-akselin moottorin syöttö on toteutettu kolmivaiheisella tyristorisuuntaajalla, ja jännitteen säätö tapahtuu suuntaajasillan tyristorien ohjauskulmaa muuttamalla. Moottorille syöttö on otettu 400 V:n keskuksesta lähdöstä PK55+03A. Moottorille magnetointipiirin syöttö otetaan samasta lähdöstä kaksivaiheisella tyristorisuuntaajalla vaiheista R ja S. Moottorin pyörimisnopeutta vahtivat digitaalinen takometri ja ryntäyssuoja.





Kuva 5.10 Valta-akselin käyttömoottori ja akseli konetason alapuolella

Valta-akselin tasavirtamoottorin pääpiirikaavio ja moottorin magnetointipiirikaavio on liitteenä 1, josta nähdään kuinka käytön moottorin nykyinen sähkönsaanti on toteutettu.

Kartonkikoneen käytöillä olevat moottorikaluston nykytehot ja uusittavan laitteiston RDC-mitoitustehot ovat listattuna liitteessä 2. Mitoitustehojen perusteella liitteeseen on valittu ABB:n tuoteluettelosta standardimoottoreiden (epätahti) hyötysuhteita vertailukohteiksi vanhojen käytössä olevien moottoreiden hyötysuhteisiin nähden. Tuoteluettelosta on valittu standardimoottoreista parhaimman hyötysuhteen moottoreiden arvot. Liitteestä voidaan havaita, että uusien oikosulkumoottoreiden hyötysuhteet ovat verraten parempia kuin käytössä olevien tasavirtamoottoreiden vastaavat arvot. Mitä suurempi moottori on kyseessä, sen parempi on hyötysuhde.

Puristinosan ja kuivatusosan mitoitus-tehoista muodostuu suurempi teholumema, kuin valta-akselin moottorin 938 kW teholumema, liite 2. Tämä tehontarpeen nousu johtuu mm. ryömintäkäyttöjen poistamisesta, nopeuden nostosta ja koneen kiihdytysajasta paikaltaan täyteen nopeuteen. Vanhan valta-akselin moot-



torin mitoituksessa on huomioitava, että kaikkia valta-akselin käyttöjä ei laiteta pyörimään samaan aikaan, vaan portaittain, jolloin säästytään suurelta hetkelliseltä tehontarpeelta.

Valta-akselin mekaniikka, moottori ja sen ohjainlaitteisto sekä käyttöjen kytkimet, vaihteet ja jarrut ovat todella vanhaa tekniikkaa, jota ei voida hyödyntää uudelleen. Käytön nykytekniikka poistuu saneerauksessa uusien laitteistojen tieltä kokonaan.

### **5.2.2 Kartonkikoneen muut sähkökäytöt**

Valta-akseliin liitettyjä käyttöjä on kaikki kuivausryhmien käytöt 1, 2, 3, 4, ja 5, 1. puristimen imutela, 2. puristimen imutela ja 3. puristimen alatela. Voima otetaan valta-akselilta kartiopyörien ja hihnan välityksellä kytkimelle ja vaihteen kautta käytölle. Kytkiminä toimivat kitkakytkimet konetasolla käyttöpuolella.

Pääasiassa koneen käyttöjen moottorit koostuvat tasavirtakoneista. Käytössä on silti joitakin pienitehoisia vaihtovirtakoneita, kuten kalanterien ohjaustelat. Vaihtovirtakoneet ovat kaikki oikosulkumoottoreita ja ovat toteutetut linjakäytöllä. Tasavirtakoneet on sijoitettu koneen käyttöpuolelle ja ne on varustettu tarvittavilla kytkimillä, vaihdekomponenteilla sekä takometreilla, pulssiantureilla. Käyttöjen moottorikanta on listattu liitteeseen 2. Koneessa on runsaasti myös muita aiemmin mainitsemattomia moottoreita mm. pumppu- ja puhallinkäytöissä.

Koneen ryömintäkäyttöinä nykyään toimivat pienet 2,6 kW:n vaihtovirtamoottorit, joiden perässä on vaihdelaatikot suurentamassa momenttia. Kuivausryhmät laitetaan ryömintäkäytöillä pyörimään hitaasti, jonka jälkeen kytketään valta-akselin käytöt pyörittämään ryhmiä. Ryömintäkäytöt toimivat ns. ryhmien alkuvauhdittajana ennen varsinaista ajoa, kuva 4.3. Koneen käyttöjen uusinnassa ei ryömintäkäytöille ole enää tarvetta.

### **5.3 Valta-akselikäytön vahvuudet ja heikkoudet**

Lähtökohtaisesti valta-akselikäytön rakenne on toimiva, ja sillä pystytään tulemaan toimeen nykyisillä ajonopeuksilla. Nopeuden nosto pakottaa tekemään muutoksia koneen käytöille ja seuraavassa on listattuna nykyisen käyttötekniikan olennaisia vahvuuksia ja heikkouksia.

#### **Nykytekniikan vahvuudet**

- toimintavarma tekniikka varauksin
- ei herkkä pienille sähkökatkoille johtuen suuresta hitausmassasta

#### **Nykytekniikan haitat ja heikkoudet**

- vanhan päämoottorin vikariskit
- säännöllinen mekaanisen huollon tarve
- säännöllinen sähkömoottorin huollon tarve
- runsaasti mekaanisesti kulumia osia
- rajallinen moottorin ja käytön pyörintänopeus
- säädön epätarkkuus
- kaikki valta-akselin käytöt yhden harvinaisen moottorin perässä
- ryhmät tarvitsevat erilliset ryömintäkäytöt pääkäytön lisäksi
- energiaa hukkaava ja tilaa vievä käyttöratkaisu

Pitkä, yli 85 metrin valta-akseli joutuu koetukselle käytössä. Arvioiden mukaan valta-akseli kiertyy noin 1,5 kierrosta koko matkalla. Näin ollen valta-akselia pyörittävästä moottorista nähtynä akselin vastapuoleinen pää pyörii 1,5 kierrosta jääneenä.

Kartonkikone 1 on rakennettu siirtomaan päälle, ja edelleen tapahtuu hidasta maan vajoamista koneen rakenteiden alla. Vajoamisen seurauksien estämiseksi on asennettu tukirakennelmia, mutta silti rakenteiden elämistä on havaittavissa. Pitkän valta-akselin kanssa on ongelmia, sillä rakenteiden eläminen vaikuttaa akselin tarkkaan linjaukseen. Linjauksen muuttuessa joutuvat laakerit mekaanisen rasituksen alaiseksi ja kuluvat nopeasti vaihtokuntoon. Kartonkikoneen kar-

tongin tuotanto kaikkine osa-alueineen tuottaa paljon eritaajuisia värähtelyitä, jotka varmasti tehostavat rakenteiden liikehdintää.

## 6 SÄHKÖKÄYTÖT

Teollisuudessa monenlaiset prosessit vaativat toimiakseen erilaisia sähkölaitteita. Yksi tärkeimmistä ryhmistä on sähkömoottorit. Moottoreilla pyöritetään puhaltimia, pumppuja, kuljettimia sekä prosessin pyöriviä laitteita kuten kartonkikonetta. Kartonkikoneessa on suuri määrä erilaisia koneita hoitamassa kukin tiettyä osaa kokonaisuudesta. Kartonkikoneen sähkömoottorikäytöt voidaan karkeasti jakaa kahteen eri luokkaan niiden toiminnan ja käyttötarkoituksen perusteella. Kiinteänopeuksinen käyttö soveltuu vain tiettyihin kohteisiin sen yksinkertaisuuden ja edullisen hinnan ansiosta. Vaativimpiin käyttökohteisiin suositetaan säädettyjä moottorikäyttöjä niiden monipuolisuuden vuoksi. Suurin osa moottoreista on sellaisia, joita voidaan käyttää sekä moottorina että generaattorina. Tästä syystä niitä nimitetään yleisesti vain käyttö sähköön mukaan vaihtovirta-, tasavirta- ja kolmivaihekoneiksi.

Koneiden kuormitettavuuteen vaikuttaa mm. se, kuinka tehokkaasti konetta pystytään jäähdyttämään. Hyvällä ja tehokkaalla koneen jäähdyttämällä voidaan mitoittaa koneen koko astetta pienemmäksi joissakin tapauksissa ja tällöin voidaan säästää kustannuksissa. Koneen jäähdytys voidaan toteuttaa seuraavin menetelmin:

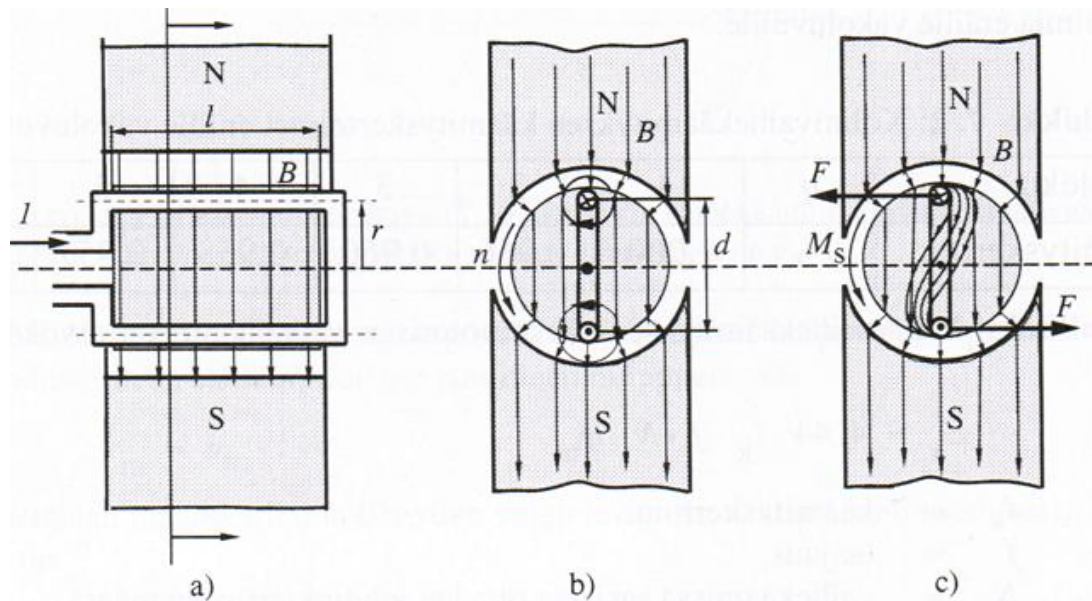
- luonnollinen jäähdytys; vapaa ilmakierto koneen osien ympärillä ilman tuuletusta,
- oma jäähdytys; koneen roottorin akselille kiinnitetty tuuletin tai roottorin pyörittämä tuuletin (yleisesti AC- koneet),
- vieras jäähdytys; erillisellä jäähdytyspuhaltimella toteutettu tuuletus (yleisesti DC- koneet) tai
- vesijäähdytys; virtaavan veden aikaansaama jäähdytys (erikoistapaukset).

Käyttöjen uusinnassa varteenotettavin jäähdytystapa on moottoreiden oma jäähdytys, jossa moottorin roottorin akselille on kiinnitetty tuuletin. Menetelmä on yleisesti käytetty vastaavissa käytöissä epätahtikoneilla.

Paperi- ja kartonkikoneilla sähkökäyttöjen päätarkoituksena on pyörittää käyttöryhmiä täsmälleen tietyllä halutulla nopeudella. Käyttöjen tulee pyöriä tasaisesti, jotta rullaimella savutetaan mahdollisimman laadukas lopputuote. Sähkökäytöt eivät saa aiheuttaa katkoja tai muuta laatua heikentävää tekijää rataa. Nykyaikaiset digitaalisella säädöllä varustetut sähkökäytöt toteuttavat nämä halutut vaatimukset. Vanhemmilla käytöillä yritetään kestää mahdollisuuksien mukaan säätöteknisissä rajoissa, jotta lopputuote olisi laadultaan myös niiden osalta laadukasta. (Knowpap 7.0 2005.)

### **Sähkökäytöt yleisesti**

Sähkömoottori muuntaa sähköenergian mekaaniseksi energiaksi. Sähkömoottorin toiminta perustuu virrallisen johtimen johdinsilmukan ja magneettikentän väliseen voimavaikutukseen. Staattorilla on oma magneettikenttä napojen välillä. Kun roottorin johdinsilmukassa kiertää virta, se saa aikaan silmukan ympärille oman magneettikentän. Kun staattorin ja roottorin magneettikentät yhdistyvät, syntyy resaltoiva magneettikenttä. Pystyssä olevan johdinsilmukan osiin, jotka leikkaavat magneettikenttää, vaikuttavat yhtä suuret ja vastakkaisuuntaiset voimat  $F$ . Tämä ns. voimapari pyrkii kääntämään silmukan vaakasuoraan asentoon. Tätä teoriaa havainnollistaa seuraava kuva 6.1.



Kuva 6.1 Sähkömoottorin yleinen toimintaperiaate (Aura & Tonteri 1996 b)

Kuvassa 6.1 vasemmalla piirros a) esittää tilannetta, kun virrallinen johdinsilmukka on magneettikentässä, keskellä piirroksessa b) on esitetty staattorin ja roottorin magneettikentät ja kuvassa oikealla piirroksessa c) on esitetty magneettikenttien muodostama resultoiva magneettikenttä.

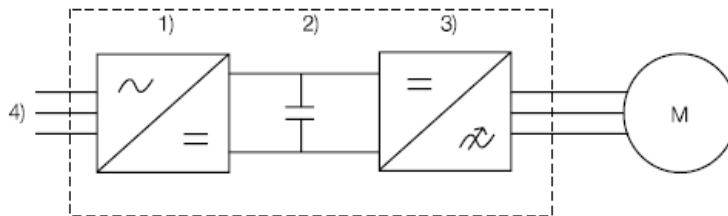
Moottorin resultoivassa magneettikentässä syntyvien voimaparien suuruuteen vaikuttavaa seuraavat tekijät:

- staattorin käämityksen magneettivuon tiheys  $B$
- roottorin silmukan virta  $I$
- roottorin sivun tehollinen pituus  $l$
- silmukan halkaisija  $d$
- silmukan tekemä kulma  $\alpha$  kenttäviivojen kanssa.

Kun moottori käynnistetään, lähtee roottori pyörimään sähköisen vääntömomentin suuntaan. Moottori saavuttaa sellaisen pyörimisnopeuden, jossa akselilla vaikuttava mekaaninen vastamomentti kumoaa sähköisen vääntömomentin. (Aura & Tonteri 1996 b.)

## Sähkökäyttöjen toteutustavat

Työkone, moottori ja sen syöttölaitteisto muodostavat yhdessä sähkökäytön. Tarkastellaan tasavirtamoottoria, vaihtovirtamoottoria, kestopagnetoitua tahtimoottoria sekä moottoreiden ohjauslaitteistoja.



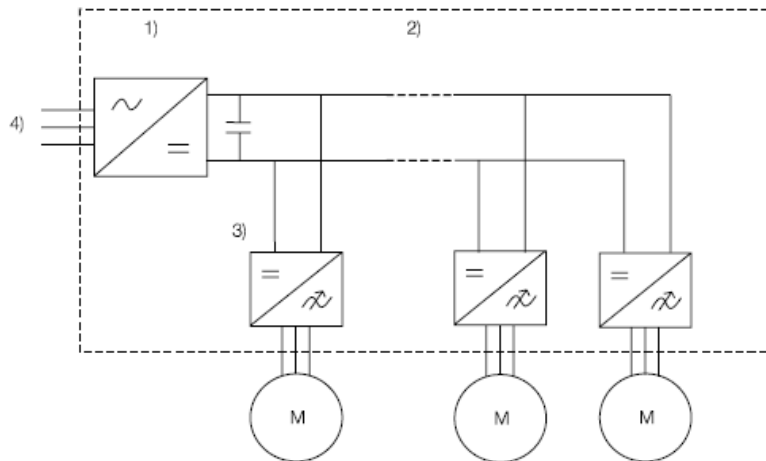
Kuva 6.2 Sähkökäytön periaatekuva (Tekninen opas nro 7)

Kuvassa 6.2 on kuvattu sähkökäytön periaatekuva, jossa taajuusmuuttajalla ohjataan moottoria. Kuvassa merkintä 1) osoittaa tasasuuntaajaa, 2) tasajännitevälipiiriä, 3) vaihtosuuntaajaa, 4) 3~ sähkönsyöttöä ja M moottoria. Katkoviihalla kehystetty alue kuvaa kokonaisuudessaan taajuusmuuttajaa.

Kuvan 1 mukainen laitteisto toimii siten, että sähkönsyötöstä tuleva verkkosähkö tasasuunnataan tasasuuntaajassa ja vaihtosuuntaajassa tasasähkö muunnetaan halutuksi vaihtojännitteeksi moottorille. Tasajännitevälipiirin tehtävänä on toimia energiavarastona.

Taajuusmuuttajalla voidaan ohjata kaikkia kolmea moottorityyppiä. Tasavirtamoottorille syötetään tasavirtaa, jolloin taajuusmuuttajassa ei ole vaihtosuuntausosaa vaan pelkästään säädettävä tasasuuntausosa. Vaihtovirtamoottorin ja kestopagnetoidun tahtimoottorin taajuusmuuttajat ovat kuvan 6.2 mukaisia säädettävällä vaihtosuuntausosalla.

Sähkökäyttöön voidaan liittää useampiakin moottoreita, jolloin sähkökäytössä on erillinen tasasuuntausyksikkö. Vaihtosuuntausyksiköt (invertterit) on liitetty suoraan yhteiseen tasajännitevälipiiriin. Tästä sovelluksesta on kuva 6.3.



Kuva 6.3 Sähkökäyttö useilla erillisillä vaihtosuuntausyksiköillä, linjakäyttö (Tekninen opas nro 7)

Kuvassa 6.3 katkoviivoitettu osa kuvaa ns. taajuusmuuttajan pääosia, mutta osat voivat sijaita kaukanakin toisistaan. Sähkökäytön numeroinnit kuvassa 6.3 ovat 1) erillinen syöttöyksikkö (tasasuuntausosa), 2) yhteinen tasajännitevälipiiri, 3) vaihtosuuntausyksiköt (invertterit) ja 4) sähkönsyöttö. (Tekninen opas nro 7.)

Liitteessä 3 on esitetty esimerkkikuvoin tasavirtamoottori, vaihtovirtamoottori, kestopinnoitettu tahtimoottori, taajuusmuuttaja ja linjakäyttö sekä listattu niiden hyödyt ja haitat.

### Säädetyt sähkökäytöt

Säädettäviä sähkökäyttöjä on käytössä runsaasti prosessiteollisuudessa. Käyttöjä käytetään tyypillisesti pumpuissa, kuljettimissa, puhaltimissa ja paperiteollisuudessa linjakäytöissä. Pyörimisnopeuden säädöllä päästään pehmeään käynnistykseen, säädettäviin kiihdytys- ja hidastusaikoihin, hyvään nopeustarkkuuteen, korkeaan automaatioasteeseen, prosessin säädön hallintaan sekä kustannussäästöihin.

Kartonkikoneilla säädettävänä sähkökäyttöinä on käytetty yleisesti DC-sivuvirtakoneita, joita on ohjattu tyristorisilloilla. Aikaisemmin käytettiin analogista ohjauselektroniikkaa, mutta tekniikan kehittyessä on päästy digitaalisäätöihin. Tämä on tuonut helpotusta liittäessä ohjauksia ylempiin järjestelmiin. Digita-

lisoinnin myötä säädön tarkkuus on parantunut ja säätöjen muuttaminen on helpottunut. Tasavirtakoneiden hyvä säädettävyys on ollut niiden valttina, ja sen takia tasasähkökoneet ovat olleet yleisessä käytössä teollisuudessa säädetyissä käytöissä.

Elektroniikka on kehittynyt paljon, ja sen myötä vaihtosähkökoneet ovat tulleet korvaamaan tasasähkökoneita yhä enemmän. Vaihtosähköllä toimivien oikosulkumoottoreiden pyörimisnopeutta muutetaan taajuusmuuttajilla. Vaihtovirtakoneet ovat yleistyneet niiden vähäisen huollon ja helpon käytön myötä. Sama säätö voidaan toteuttaa nykyään niin AC-käyttöillä kuin DC-käyttöilläkin.

Kestomagnetoidut tahtikoneet taajuusmuuttajaohjattuina tekevät aluevaltausta paperiteollisuuteen niiden hyvien ominaisuuksien myötä. Tekniikka niissä on tuttua generaattorikäytöissä suuremmista teholuokista, mutta sitä ollaan tuomassa nyt myös pienempiin teholuokkiin. Kestomagnetoituja tahtikoneita voidaan ajaa ja säätää hyvin taajuusmuuttajilla, ja ne sopivat vertailtavaksi tasavirtakoneiden ja vaihtovirtakoneiden kanssa. Tahtikoneilla saavutetaan laaja momentinvaihtelu nopeuden pysyessä vakiona. (Knowpap 7.0 2005.)

### **Kiinteänopeuksiset sähkökäytöt**

Kiinteänopeuksiset moottorit pyörivät tiettyä ennalta asetettua nopeutta, eivätkä ne ole säädettävissä. Moottoreita käytetään yksinkertaisissa käyttökohteissa, joissa ei tarvita nopeudensäätöä. Tällaisia sovelluksia ovat mm. tietyt pumput ja puhaltimet.

Vaihtovirtamoottorit luokitellaan synkronikoneisiin eli tahtikoneisiin ja asynkronikoneisiin eli epätahtikoneisiin. Luokittelu tehdään pyörimisnopeuden ja taajuuden välisestä suhteesta. Synkronikoneissa pyörimisnopeus ei ole säädettävissä, koska ne pyörivät verkon syöttävää taajuutta vastaavalla synkroninopeudella. Epätahtikonetta kutsutaan usein myös oikosulkukoneeksi. Epätahtikoneet pyörivät jättämän verran hitaammin niiden staattorivuon synkroninopeuteen nähden. (Knowpap 7.0 2005.)



## 6.1 Tasavirtakone

Tasasähkökone eli nk. tasavirtakone on vanhin käytössä olevista sähkömoottorityypeistä. Tasavirtakone koostuu kahdesta pääosasta: runko-osasta ja roottorista. Tasavirtakoneen etuna on sen hyvä ja tarkka nopeuden sekä vääntömomentin ohjaus. Tämän vuoksi tasavirtakone on ollut suosittuna paperiteollisuudessa.

Tasavirtakone on rakennettu toimintatapsa mukaisesti magneettikentän tarpeita vastaavaksi. Koneen rautaosat muodostavat magneettikentälle tietynlaiset magneettipiirit. Tasavirtakoneissa magneettivuot muodostavat tasamagneettikenttiä, ja tästä syystä koneiden kehät ja napojen rautaosat ovat täysrautaa. Rautahäviöiden minimoimiseksi napakenkiä voidaan valmistaa sähkölevyistä. Ankkurin rautasydän on tehty sähkölevystä sen vuoksi, että se joutuu pyörimään tasamagneettikentässä. Pyörimisliike aiheuttaa vuon vaihtelun ja rautahäviöitä. (Aura & Tonteri 1986 a, b.)

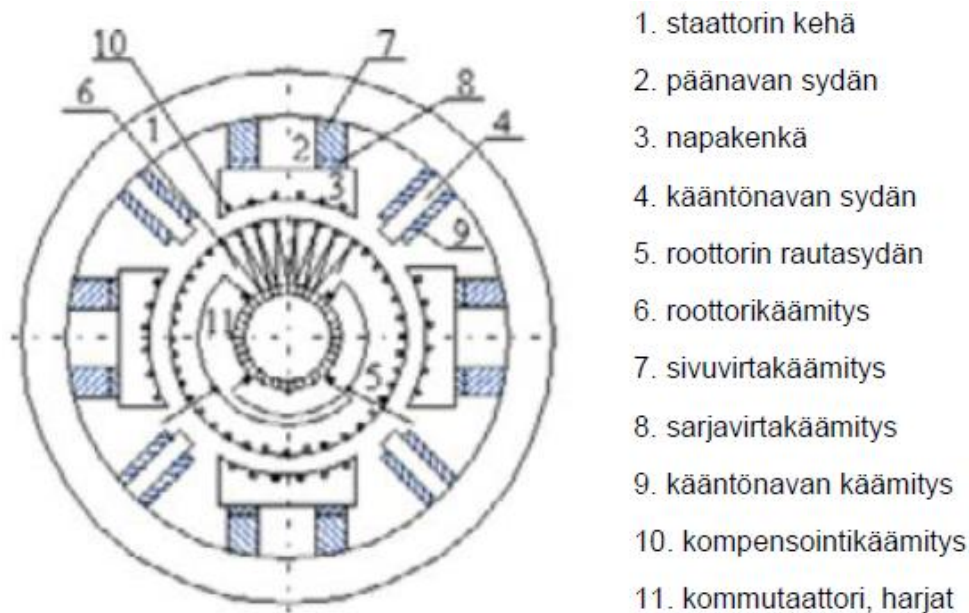


Kuva 6.4 KA1 rullaajan rummun käyttömoottori,  $P_n$  on 120 kW

Kuvassa 6.4 käytössä on hammasvaihteella varustettu tasavirtakone. Moottori on liitetty koneen käyttöjen yhteiseen puhallinjäähdytysjärjestelmään, ja moottorin päässä on kytkettynä takometri pyörimisnopeutta vahtimassa.

Tasavirtakoneen toimintaan vaikuttaa suuresti koneen magnetoinnin toteutustapa. Magnetoinnin mukaan koneet jaetaan seuraaviin ryhmiin: vierasmagnetoidut

moottorit, sivuvirtamoottorit, sarjamoottorit ja compoundimoottorit. Tarkastellaan nyt vierasmagnetoidun sivuvirtamoottorin toimintaa, sillä sen ominaisuudet vastaavat monessa suhteessa oikosulkumoottoria.



Kuva 6.5 Nelinapaisen tasavirtakoneen leikkauskuva (Korpinen 2010)

Ennen kuin sähkömoottorin katkaisija voidaan sulkea, on huolehdittava, että moottorin magnetoimisjännite  $U_m$  on kytketty päälle ja magnetoimisvirta  $I_m$  on ohjearvon mukainen. Tällöin moottori saavuttaa riittävän käynnistysmomentin ja oikean toiminnan. Moottori voidaan käynnistää säätämällä ankkuripiiriin jännitettä  $U = 0 \dots U_n$  tai moottorin ankkuripiiriin sarjaan kytkettävällä sarjavastuksella  $R$ . Sarjavastusta käytetään silloin, kun ankkuripiiriin jännite ei ole säädettävissä. Sarjavastusta pienennetään moottorin pyörimisnopeuden kasvaessa, jotta moottorin sähkövääntömomentti pysyy hyvänä. Kun moottori on käynnistetty, sarjavastus kytketään pois kokonaan. Yleensä kartonkikonekäyttöjen nopeudensäädössä käytetään ankkurijännitteen säätöä. Moottorin käynnistyttyä on sen pyörimisnopeus seuraavan kaavan (6.1) mukainen.

$$n = \frac{U - I_a R_A - U_H}{k\Phi} \cong \frac{U - I_a R_A}{k\Phi} \quad (6.1)$$

jossa  $k$  on koneen rakennevakio.

Moottorin pyörimisnopeus  $n$  on verrannollinen ankkurijännitteen  $U$  ja ankkurivirran  $I$  aiheuttamaan jännitehäviön  $I_a R_A$  erotukseen  $U - I_a R_A$  sekä kääntäen verrannollinen moottorin magneettivuohon  $\Phi$ . Kaavassa (6.1) ei oteta huomioon ankkurivirran marginaalista vaikutusta magneettivuohon.

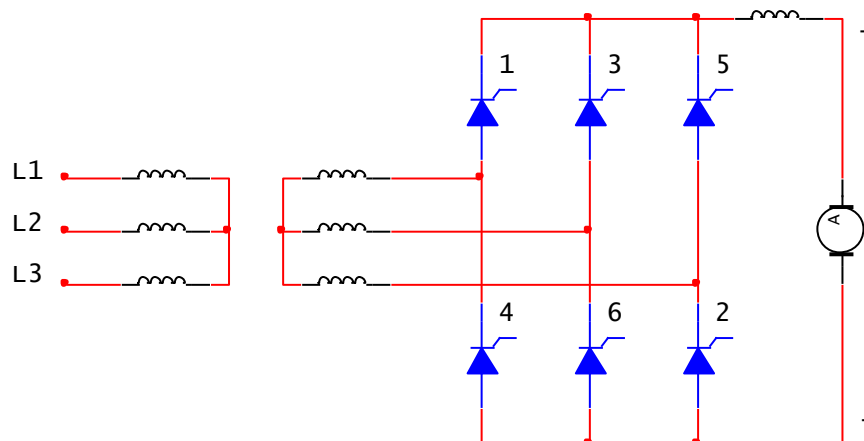
Kaavasta (6.1) nähdään magnetoinnin merkitys. Magneettivuon pienentyessä moottorin pyörimisnopeus kasvaa. Jos magnetointi häviää, ankkurivirta kasvaa rajusti, moottori ryntää ja kommutaattoriin syntyy kehätuli. Tämän vuoksi magnetointipiiriin ei saa asentaa sulakkeita, eikä piiriä saa käynnin aikana katkaista.

Moottorin aikaansaama vääntömomentti  $M$  on verrannollinen ankkurivirtaan  $I$  ja magneettivuohon  $\Phi$  kaavan (6.2) mukaan. (Aura & Tonteri 1996a.)

$$M \sim \frac{k}{2\pi} * I * \Phi \quad (6.2)$$

### Tyristorisuuntaaja

Säädettävää tasasähkömoottoria syötetään tavallisesti säädettävällä kolmivaiheverkkoon kytketyllä tyristorisuuntaajalla. Sillasta saatavan tasajännitteen suuruutta voidaan säätää tyristoreille annettavan ohjauskulman  $\alpha$  arvoa muuttamalla. On olemassa useita erilaisia siltatyyppejä, joista yleisin on kolmivaiheinen, kaksitie- eli siltakytkentäinen ja kuusisykkeinen suuntaaja.



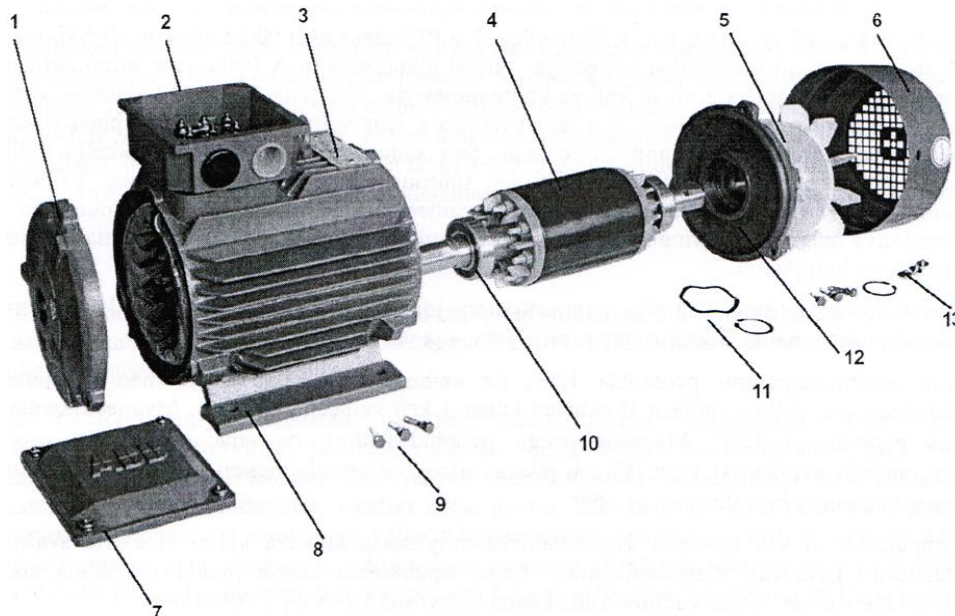
Kuva 6.6 Tyristoriohjattu kolmivaiheinen siltakytkentä

## 6.2 Vaihtovirtakone

Yleisesti kutsutut vaihtovirtamoottorit, oikosulkumoottorit, ovat eniten käytettyjä sähkömoottoreita. Oikosulkukoneella on paljon hyviä ominaisuuksia muihin moottorityyppeihin verrattuna. Koneella on verraten hyvä hyötysuhde ja vähäinen huollon tarve, josta johtuvat alhaiset kustannukset. Ainoat koneen huoltoon liittyvät seikat ovat laakereiden kunnon tarkkailu ja koneen puhtaana pitäminen päältäpäin. Oikosulkukone sopii vaativiinkin ympäristöolosuhteisiin, koneelle on saatavissa useita vaihtoehtoisia pyörimisnopeuksia ja koneet ovat IEC-standardin mukaisia vakiolaitteita. (Knowpap 7.0 2005.)

### Ominaisuudet ja rakenne

Oikosulkukone rakentuu renkaan muotoisista rautalevyistä tehdystä staattorista, jossa on kolmivaihekäämitys. Moottorin synkroninopeuden määrää staattorikäämityksen napapariluku  $p$  ja verkon syöttötaajuus  $f$ . Akselinopeus on synkroninopeutta jättämän verran pienempi ja jättämä suurenee kuormitusmomentin kasvaessa. Jättämä on erilainen erilaisilla koneilla ja siihen vaikuttaa koneen kuormitus, koneen koko ja sen rakenne. Jättämän perusteella oikosulkukoneita kutsutaan myös asynkronimoottoreiksi. (Knowpap 7.0 2005.)



Kuva 6.7 Kolmivaiheisen oikosulkumoottorin räjäytyskuva (Ruppa & Lilja 2003)

Kuvan 6.7 numeroidut osat ovat:

- |                          |                          |                   |
|--------------------------|--------------------------|-------------------|
| 1. D-pään kilpi          | 5. Tuuletin              | 9. Pultti         |
| 2. Liitäntäkotelon runko | 6. Tuuletinsuojus        | 10. Laakeri       |
| 3. Nimikilpi             | 7. Liitäntäkotelon kansi | 11. Aksiaalijousi |
| 4. Roottori              | 8. Staattori             | 12. N-pään kilpi  |
|                          |                          | 13. Ruuvi         |

*Roottori.* Staattorin sisällä oleva roottori rakentuu rautalevypakasta. Roottorin uriin on laitettu roottorikäänitys joko alumiini- tai kuparisauvoista. Käämien päät on oikosuljettu molemmista päistä näin tehden suljetun virtapiirin, josta tulee myös nimitys oikosulkukone. Roottori on laakeroitu koneen runkoon ja laakerit ovat koneen ainoat kuluvat osat.

*Staattori.* Staattorikäänityspaketti sijoitetaan koneen alumiinista tai valuraudasta valettuun runkoon, missä on pitkittäin muotoillut jäähdytysrivat. Koneen jäähdytys on tavallisesti hoidettu akselille sijoitetulla kiinteällä tuuletinsiivellä, joka puhaltaa ilmavirran koneeseen ja koneen kylkiin jäähdytysripiihin. Rungossa on koneen päällä tai kyljessä avattava kytkentärasia. Kone kytketään joko tähteen (Y) tai kolmioon (D) riippuen sen sisäisestä käämityksestä. Yleensä standardioikosulkumoottoreissa on merkintä 690 V/ 400 V. Merkintä mahdollistaa tähtikolmiokäynnistyksen (Y/D) ja koneen kytkemisen joko tähtikytkettynä 690 V:n jännitteeseen tai kolmiokytkettynä 400 V:n jännitteeseen.

*Lämpösuojat.* Suuremmissa koneissa käytetään lämpösuojia, PT-100-antureita tai PTC-vastuksia käämien liiallisen kuumenemisen estämiseksi. Jos käytetään lämpösuojia, joudutaan myös moottorisyöttö varustamaan suojaileistyksellä. Nykyään taajuusmuuttajissa on valmiudet lämpösuojien kytkemiselle muuttajalle suoraan ja näin pystytään suojaus toteuttamaan edullisesti ja helposti. (Know-pap 7.0 2005.)

### **Toimintaperiaate**

Oikosulkumoottori toimii samalla periaatteella kuin muuntaja. Staattorikäämiin kolmivaiheinen syöttöjännite muodostaa magnetointivirran, ja virta puolestaan

saa aikaan pyörivän magneettikentän. Magneettikenttä pyörii koneen napapari-luvun ja syöttötaajuuden määräämällä nopeudella. Tyhjäkäyvä moottori ottaa vain loisvirtaa magnetointiin, sillä roottorin rauta- ja kitkahäviöt ovat sen verran pieniä, että ne voi jättää huomiotta. Magnetointivirran arvo pysyy vakiona tyhjäkäynnistä kuormitettuun tilanteeseen, jos kuormitettaessa jännite pysyy vakiona. (Knowpap 7.0 2005.)

*Synkroninopeus.* Koneen synkroninopeuden määrää verkon nimellinen syöttötaajuus  $f_n$  ja koneen napapariluku  $p$ . Synkroninopeus on suoraan verrannollinen verkon syöttötaajuuteen, joten nopeuden muutos on nykyisin helppo toteuttaa taajuusmuuttajalla. Synkroninopeus  $n_s$  r/min määräytyy kaavan (6.3) mukaan.

$$n_s = \frac{f_n}{p} * 60min \quad (6.3)$$

Taulukko 6.1 Oikosulkumoottorien yleisimmät vakionopeudet ja napaparien määrät, kun  $f$  on 50 Hz

Napaparien lukumäärä, $p$	synkroninopeus, $n_s$ r/min
1	3000
2	1500
3	1000
4	750
5	600
6	500

Normaalilla 50 Hz:n verkkojännitteen taajuudella suurin synkroninopeus on 3000 r/min, ja muut nopeudet saadaan muuttamalla koneen napaparien lukumäärää. Tavallisesti käytetään 1000 r/min, 1500 r/min tai 3000 r/min moottoreita. Näistä yleisin on 1500 r/min moottori.

*Roottorivirta.* Seisovan koneen roottorin käämitykseen muodostuu virta, joka tässä tilanteessa vastaa oikosulussa olevan muuntajan toisiovirtaa. Staattoriin muodostuu lisävirta roottorivirrasta johtuen. Suorakäynnistyksessä roottorivirta kasvaa 5-7-kertaiseksi moottorin nimelliseen virtaan verrattuna. Tästä johtuu, että moottorin etusulakkeet on yleensä korvattu lämpöreleillä jumi-tilanteita ja

liikakuormitusta varten. Tähti-kolmio- ja pehmokäynnistyksessä saadaan käynnistysvirtaa pudotettua merkittävästi. (Tekninen opas nro 7.)

Käynnistyksen alussa roottoriin vaikuttaa syöttötaajuinen jännite ja käämin induktanssin takia roottorivirta on jännitteeseen nähden erivaiheinen, joten vääntömomentti ei ole suurin mahdollinen johtuen virran ja jännitteen välisestä vaihe-erosta.

Roottorin pyöriessä magneettikentän ja roottorisauvojen välinen nopeusero pienenee, jolloin roottorijännite ja roottorisauvojen jännitteen taajuus myös pienenee.

*Jättämä.* Roottorin ja magneettikentän välistä nopeuseroa kutsutaan jättämäksi. Usein jättämä ilmoitetaan suhteellisenä arvona  $s$ . Jos roottori pyörisi synkroninopeudella, ei olisi momenttia laisinkaan, koska roottoriin ei synny jännitettä eikä silloin myöskään virtaa. Oikosulkukoneessa siis aina on jonkinlainen jättämä koneen koosta ja sen ominaisuuksista riippuen 0,5-7 %. Jättämä määritellään tavallisesti nimellispisteessä  $s_n$ , jolloin taajuus  $f_n$ , nopeus  $n_n$ , momentti  $M_n$ , jännite  $U_n$ , virta  $I_n$  ja teho  $P_n$  ovat nimellisiä arvoja.

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} * 100\% \quad (6.4)$$

jossa  $n_s$  on synkroninopeus.

*Moottorin akselinopeus* saadaan, kun synkroninopeudesta vähennetään jättämän osuus.

$$n_n = n_s - \Delta n_n = n_s * (1 - s_n) \quad (6.5)$$

jossa  $s_n$  on suhteellinen jättämä. (Knowpap 7.0 2005.)

### **Arvokilpitiedot ja pyörimissuunta**

Moottorien tekniset toteutukset soveltavat standardia IEC 34- 7. Standardin mukaan moottorin molemmat päät on merkitty: D (Drive end) ja N (Non Drive end).

Moottori on käämitty siten, että kytkettäessä vaiheet kytkentäohjeen mukaan moottori pyörii D-päästä katsottuna myötäpäivään. Pyörimissuunnan voi helpos-

ti vaihtaa muuttamalla kahden vaihejohtimen paikkaa keskenään. Eri valmistajien moottorit käyvät samalle konepaikalle suoraan, sillä oikosulkumoottoreiden akselikorkeus H ja akselihalkaisija D ovat standardoituja IEC- standardissa. Ensimmäinen numerosarja kertoo akselikorkeuden, välissä oleva kirjain kertoo staattorin pituuden ja toinen numerosarja akselin halkaisijan. Esimerkiksi ABB:n valmistama kone 200M55, missä akselikorkeus on 200 mm, staattorin pituusluokka on M ja akselin halkaisija on 55 mm.

Moottorin arvokilvestä voi selvittää kyseisen moottorin tarvittavat tiedot ja tietojen perusteella valmistajalta saa lisätietoja koneesta tarpeen mukaan. Jos arvokilpi katoaa tai tuhoutuu, on vaikea saada koneen tietoja selville, koska samaan konerunkoon voidaan rakentaa erilaisella käämityksellä olevia moottorityyppejä. Tämän vuoksi teollisuudessa, jossa on paljon koneita käytössä, on syytä pitää konepaikkojen konetiedot ajan tasalla koneen tyyppikilpien lisäksi. Arvokilvestä näkyvät mm. seuraavat moottorin tiedot:

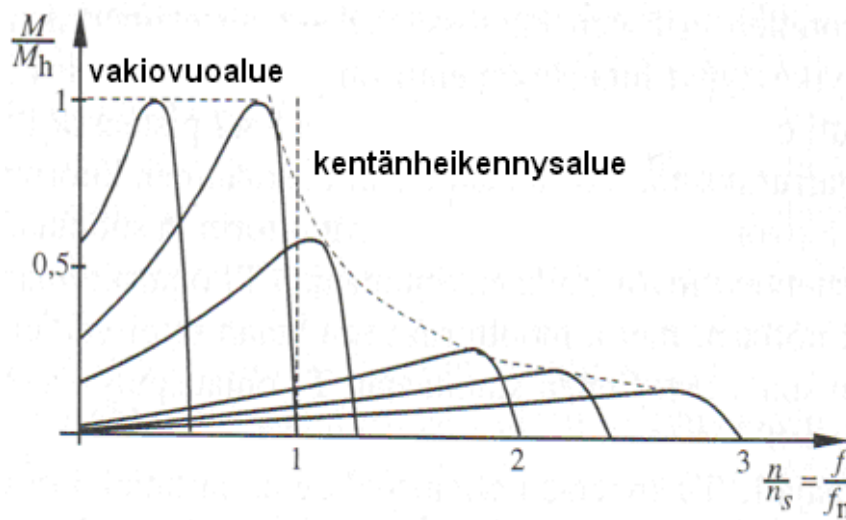
- nimellistaajuus
- nimellisteho
- nimellisnopeus tietyllä taajuudella
- eristysluokka
- tehokerroin
- nimellisjännite tähti- ja kolmiokytkettynä
- nimellisvirta tähti- ja kolmiokytkettynä
- kotelointiluokitus
- massa
- tyyppimerkintään sisällytetty akselikorkeus.

Tavallisesti moottorit on nimellisteholtaan mitoitettu eristeiden mukaan. Yleensä moottorin lämpimimmän pisteen eristys mitoitetaan nimellistehon ja 40 °C:een ympäristön lämpötilan mukaan. Mikäli koneen ympäröivä lämpötila tästä nousee, joudutaan mahdollisesti pienentämään koneen tehoa nimellisestä eristeiden kestämissä vuoksi. (ABB Group 2000.)



## Ohjaus ja säätö

Oikosulkukoneen pyörimisnopeuteen vaikuttaa syöttöverkon taajuus ja koneen napapariluku, taulukko 5.1. Napaparien määrällä voidaan vaikuttaa nopeusportain koneen haluttuun kiinteään pyörimisnopeuteen. Yhteen koneeseen on mahdollista asentaa muutama kiinteä porras. Nykyään oikosulkukoneen pyörimisnopeuden säätö toteutetaan tavallisesti taajuusmuuttajalla muuttamalla syöttävän verkon taajuutta.



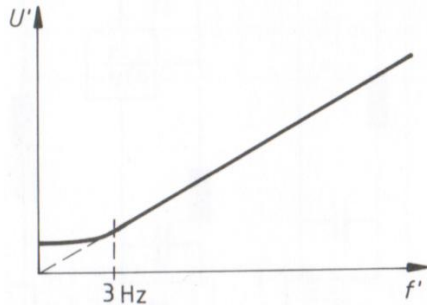
Kuva 6.8 Taajuusohjatun oikosulkumoottorin suhteellinen vääntömomentti erilaisilla syöttöjännitteen taajuuksilla (Aura & Tonteri 1986 c)

Kuvassa 6.8  $M_h$  on moottorin maksimi- eli huippumomentti,  $M$  moottorin momentti  $n_s$  synkroninopeus eli tahtinopeus,  $f_n$  syöttävän sähköverkon vakiona pysyvä nimellistaajuus,  $n$  moottorin pyörimisnopeus ja  $f$  moottoria syöttävän jännitteen taajuus.

Nimellistaajuuden alapuolella moottori toimii vakiovuoalueella ja sen yläpuolella kentänheikennysalueella. Kentänheikennysalueella moottori toimii vakioteholla, joten tätä aluetta kutsutaan myös vakiotehoalueeksi.

*Vakiovuoalueella* syöttöjännitteen  $U$  ja taajuuden  $f$  suhde ( $U/f$ ) pysyy vakiona, jolloin koneen magneettivuo pysyy vakiona ja momentin maksimiarvo ei muutu koneen nopeutta muutettaessa. Ohjauksessa koneen vakiovuoalueella liikuttaessa koneen momenttikäyrä pysyy samanmuotoisena. Aivan pienillä  $< 3\text{Hz}$  taa-

juuksilla  $U/f$ - suhde ei enää päde, joka johtuu koneen rakenteesta johtuvista tekijöistä. Tiedetään, että jos epätahtikoneen magneettivuo pysyy vakiona, niin suhde pysyy  $U/f$  vakiona. Tällöin päästään haluttuun tulokseen yksinkertaisesti. (Aura & Tonteri 1986c.)



Kuva 6.9 Epätahtimootorin ominaiskäyräohjaus, suhde  $U/f$  (Aura & Tonteri 1986c)

*Kentänheikennysalueella* päästään koneen nimellinopeutta suurempiin nopeuksiin. Syöttöjännite  $U$  pysyy nimellisjännitteen  $U_n$  suuruisena ja taajuus  $f$  suurenee yli nimellistaajuuden  $f_n$ . Kentänheikennysalueella liikuttaessa moottorin momenttia  $M$  on pienennettävä, jottei kone käy yliteholla. Nopeutta voi kasvattaa 2-3-kertaiseksi nimelliseen nopeuteen verrattuna rakenteellisen nopeuden sallimissa rajoissa. Rajoitteena kentänheikennykselle on mm. ryhmäkäyttö. (Aura & Tonteri 1996c.)

Oikosulkumootorin maksimimomentti on verrannollinen magneettivuon  $\Psi$  neliöön. Vakiovuoalueella  $M_{\max}$  noudattaa yhtälöä (6.6).

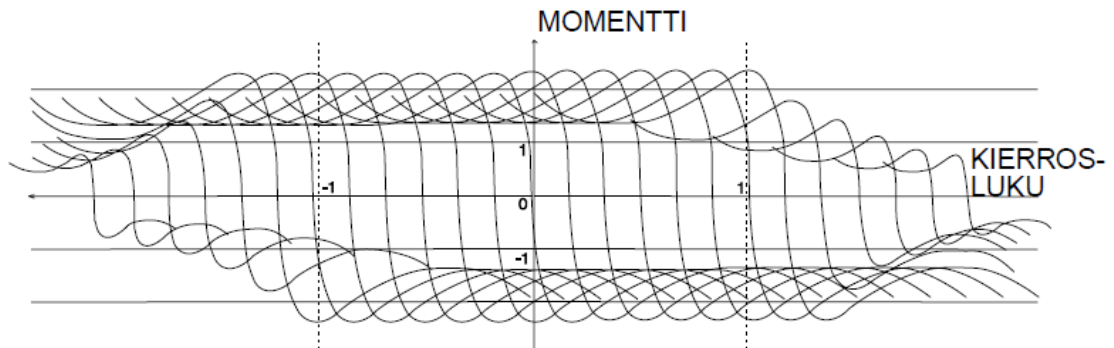
$$M_{\max} \sim \Psi^2 \quad (6.6)$$

Näin vakiovuoalueella maksimimomentti on suunnilleen vakio. Kentänheikennysalueella maksimimomentti on kääntäen verrannollinen taajuuden neliöön. Kentänheikennysalueella  $M_{\max}$  noudattaa yhtälöä (6.7).

$$M_{\max} \sim \left( \frac{f_n}{f} \right)^2, \quad (6.7)$$

jossa  $f_n$  on nimellistaajuus ja  $f$  on moottorille syötettävän jännitteen taajuus kentänheikennysalueella,  $f > f_n$ .

Taajuusmuuttajan avulla voidaan syöttää oikosulkumoottoria seuraavan kuvan mukaisesti. Oikosulkukonetta voidaan pyörittää molempiin suuntiin, ja se voi toimia myös jarruna ja generaattorina, kuva 6.10.



Kuva 6.10 Taajuusmuuttajan syöttämä oikosulkumoottorin momentti- ja kierroskäyrät (Tekninen opas nro 7.)

Moottorin maksimimomentti  $M_{\max}$  on käytettävissä vain lyhytaikaista ylitystä varten vakiovuoalueella 0-1. Taajuusmuuttajat rajoittavat konekäytön maksimimomentin yleensä 70 % maksimimomentista  $M_{\max}$ . (Tekninen opas nro 7.)

### 6.3 Tahtikone

Tahtikoneessa roottori pyörii samassa tahdissa staattorin magneettikentän kanssa taajuuden määräämällä synkroninopeudella, josta johtuu nimi tahtikone.

Tahtikonetta voidaan myös käyttää moottorina tai generaattorina. Tahtikonetta käytetään vielä nykyään moottorina harvoin, sillä sen käyttö on rajoittunut erikoistapauksiin. Generaattorina sitä käytetään yleisesti sähköntuotannossa suurissa teholuokissa ja moottorina mm. suurissa laivamoottorikäytöissä. Tahtikoneita on virtamagnetoituja ja kestmagnetoituja. Kestomagnetoituja moottoreita on saatavilla kymmeneen megawattiin asti. Tavallinen virtamagnetoitu moottori on kallis ja vaatii magnetoinnilta tasasähkösyötön elektroniikkalaitteineen. Yleensä sitä käytetään suurissa tehotarpeissa kuudesta megawatista ylöspäin. (LUT.)

Kartonkikoneen moottorikäyttöjen kannalta tulee tarkastella tahtikoneista kestmagnetoinnilla olevien moottoriratkaisujen ominaisuuksia.

## **Kestomagnetoitu tahtikone**

Uusin sovellus synkronikoneissa ovat kestopagneettikoneet, jotka mahdollistavat synkronikoneen käytön myös pienemmissä sovelluksissa. Kestomagnetoitu synkronikone pystyy kilpailemaan runsaasti käytettyjen oikosulkukoneiden ja tasavirtakoneiden kanssa. Kestomagnetoidulla tahtikoneella saavutetaan parempi hyötysuhde ja suurempi vääntömomentti verrattuna vastaavan kokoluokan oikosulkumoottoriin. Tämän johdosta on mahdollista toteuttaa käytön moottoriratkaisu kestopagnetoidulla tahtikoneella oikosulkumoottorin ja vaihteiston asemasta sellaisenaan. (LUT.)

Kestomagneettitahtimoottoreita käytetään vain taajuusmuuttajasyötöllä. Koneen roottorissa on kestopagneetit, jotka magnetoivat moottorin. Magnetointitavasta johtuen konetyypillä päästään parempaan tehokertoimeen kuin induktioperiaatteella toimivalla koneella.

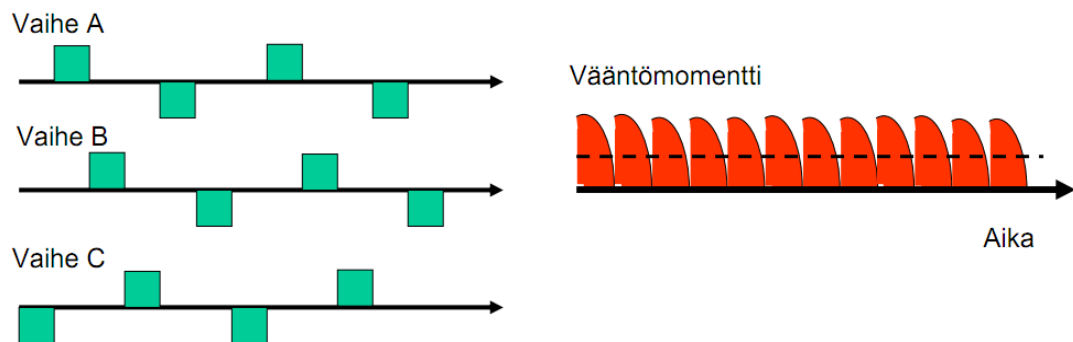
Kestomagnetoidut moottorit voidaan jakaa pintamagneettikoneisiin ja upotetuilla magneeteilla oleviin koneisiin. Pintamagnetoidussa koneessa kestopagneetit on asennettu liimaamalla roottorin pinnalle ja magneettien kiinni pysyminen on varmistettu tavallisesti lasikuitupannalla. Upotetut magneetit asennetaan roottorilaminoinnin sisään ja näin päästään hieman suurempiin nopeuksiin verrattuna pintamagnetointiratkaisuun. Käytännössä suurin ero magnetointikäytäntötapojen välillä on magneettien luomaan magneettisten ominaisuuksien symmetriaan. Pintamagnetoitu kone on magneettisesti symmetrinen, ja upotetuilla magneeteilla varustetun koneen magneettisuus riippuu tarkasteltavasta suunnasta magneettisten pitkittäis- ja poikittaisakselien mukaan, josta seuraa induktanssierot. (Wikipedia.)

## **Toiminta ja rakenne**

Kestomagneettimoottoreiden ominaisuudet ovat erityisen hyvät pienillä pyörimisnopeuksilla, sillä moninapaisten kestopagneettimoottoreiden ominaisuudet eivät huonone yhtä nopeasti kuin vastaavalla induktioperiaatteella toimivan moottorin. Kestomagneettimoottoreilla saavutetaan hyvä vääntömomentti jo nollassa nopeudesta lähtien, mutta suuria nopeuksia rajoittavat vielä magneettien

kiinni pysyminen pyörivässä roottorissa. Vääntömomentti ajan suhteen on esitetty kuvassa 6.12. (Wikipedia.)

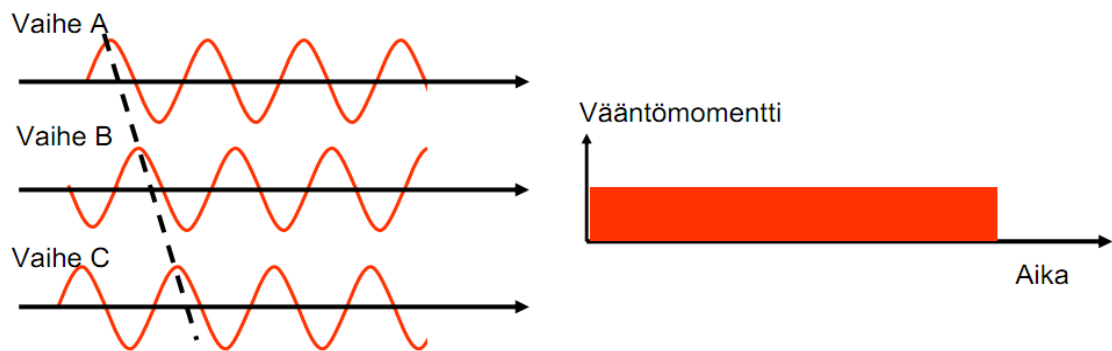
Tahtikoneen staattorissa on kolmivaiheinen käämitys samoin kuin epätahtikoneessa. Staattorin kolmivaiheiseen käämitykseen voidaan tuoda jännite pulssina, jolloin syntyvä vääntömomentti ei ole tasaista, kuva 6.11. Tällaisen tilanteen muodostavat pulssinleveysmodulaattorit, PWM-modulaattorit. Lyhenne PWM tulee sanoista Pulse-width modulation.



Kuva 6.11 Staattorille syötetty pulssimainen kolmivaiheinen jännite ja sen aikaansaama vääntömomentti (Häkkinen 2008)

Kuvassa 6.11 on havainnollistettu, että staattorille syötetty pulssimainen kolmivaiheinen jännite saa aikaan roottorille epätasaisen vääntömomentin.

Kun halutaan koneelta tasainen vääntömomentti, syötetään koneeseen täysin sinimuotoista vaihevirtaa. Lähelle täysin sinimuotoista virtaa päästään nykykäsillä 12-pulssisilla suuntaajilla. Koneen pyörimissuunta voidaan muuttaa vaihtamalla kahden vaihejohtimen paikkaa keskenään tai suoraan taajuusmuuttajasta parametreilla. Kuvassa 6.12 on havainnollistettu tasaisen vääntömomentin muodostuminen.



Kuva 6.12 Staattorille syötetty sinimuotoinen kolmivaiheinen jännite ja sen aikaansaama vääntömomentti (Häkkinen 2008)

Kun staattoriin syötetään kolmivaiheista vaihtovirtaa, roottorin navat lukkiutuvat staattorin magneettivuon määräämään asentoon, josta syntyvä voimapari saa roottorin pyörimään. Taajuusmuuttajalla voidaan tarkasti ohjata moottorin pyörimisnopeutta ja myös vaikuttavaa momenttia. Syöttötaajuuden  $f$  muutos vaikuttaa suoraan koneen synkroninopeuteen  $n_s$  kaavan 6.3 mukaisesti.

Taulukko 6.2 Tahtimoottorin synkroniset pyörimisnopeudet eri napapariluvulla, kun  $f$  on 50 Hz

$p$	$n$ 1/min	$p$	$n$ 1/min	$p$	$n$ 1/min	$p$	$n$ 1/min
1	3000	8	375	15	200	28	107,1
2	1500	9	333,3	16	187,5	30	100
3	1000	10	300	18	166,7	32	93,75
4	750	11	272,7	20	150	34	88,2
5	600	12	250	22	136,4	36	83,3
6	500	13	230,8	24	125	38	78,9
7	428,6	14	214,3	26	115,4	40	75

Kestomagneettimoottorin ohjattavuus on ollut ennen kehittyneitä taajuusmuuttajia haasteellista, koska koneessa on tasainen magnetointi, jota ei pystytä säätämään. Erityisesti kentänheikennysalue on ollut haasteellinen. Kentänheikennysalueelle on tavallisesti päästy vain ajamalla koneeseen demagnetoitua virtaa johtuen kestomagneettien pienestä permeabiliteetista. Asiaan on liittynyt myös turvallisuusriski, jos nopeus on ylittänyt 140 % nimellisestä nopeudesta. (Leppä 2003.)

Nykyään kestopagneettimoottoreita ajetaan taajuusmuuttajilla ja niiden säätö on yksinkertaista. Säätonä käytetään vektorisäätöä tai suoraa momenttisäätöä.

### **Kestomagnetoidun tahtikoneen soveltuvuus paperiteollisuuden tarpeisiin**

Suorakäyttötekniikka on kehittynyt roimasti lähivuosina ja on nykyisin erittäin varteenotettava vaihtoehto kartonkikoneen käytölle. Kestomagneettitekniikka mahdollistaa vaihteiden poisjättämisen, koska moottori tuottaa tarvittavan vääntömomentin suoraan kartonkikoneen telan pyörimisnopeudella. Uudella kestopagneettimoottorilla toteutetulla suorakäytöllä voidaan siis korvata vanhat erilisvaihderatkaisut. Kestomagneettimoottori sijoitetaan kartonkikoneen ulkopuolelle omalle perustukselle. Moottorin tuottama energia siirretään telaan suoraan kytkimen kautta. Näin säästyy mekaanisia komponentteja ja hyötysuhde on parempi.

Nykytekniikalla on mahdollista asentaa kestopagneettimoottorit myös suoraan telan tai sylinterin akselille, DrivePro-koneintegroitu käyttö. Sovellus on suunniteltu nimenomaan paperikoneita varten. Moottorin ollessa nestejäähdytteinen ja laakerien kiertoöljyvaideltuja, voidaan moottori asentaa tarvittaessa myös huu- van sisään. Ratkaisu säästää tilaa ja mekaanisia komponentteja. Kestomagneettitahtimoottoreiden hyvä hyötysuhde ja moottorin tehokerroin mahdollistavat pienemmän taajuusmuuttajan ja kaapelit sekä pienemmän energian kulutuksen.



Kuva 6.13 Suorakäyttö ja Metson ABB:n kanssa kehittänyt DrivePro- koneintegroitu käyttölaiteisto (Results pulp & paper 2/2010)



Kuva 6.14 DrivePro- koneintegroitu käyttö soveltuu kokonsa ansiosta hyvin koneistusintoihin (Results pulp & paper 2/2010)

### **Suorakäytön etuja**

- suuri vääntömomentti pienillä kierroksilla
- ei tarvita erillisiä vaihteratkaisuja
- hyvä hyötysuhde ja säätötarkkuus

### **DrivePro-koneintegroidun käytön etuja**

- asennus hoito- tai käyttöpuolelle
- ei mekaanisia komponentteja
- öljyvoidellut laakerit
- alhainen melutaso
- helppo ja nopea asennettavuus (Results pulp & paper 2/2010.)

## **6.4 Taajuusmuuttaja**

Taajuusmuuttaja on laite, joka säätelee moottorin vääntömomenttia ja pyörimisnopeutta portaattomasti.

Taajuusmuuttajassa kolmivaiheinen verkkojännite muunnetaan tasajännitteeksi tasasuuntauksessa diodi- tai tyristorisillalla. Suunnattu tasajännite suodatetaan välipiirin kuristimilla ja kondensaattoreilla puhtaammaksi tasajännitteeksi. Välipiirin tasajännite vaihtosuunnataan puolijohteilla toteutetulla invertterillä muuttu-

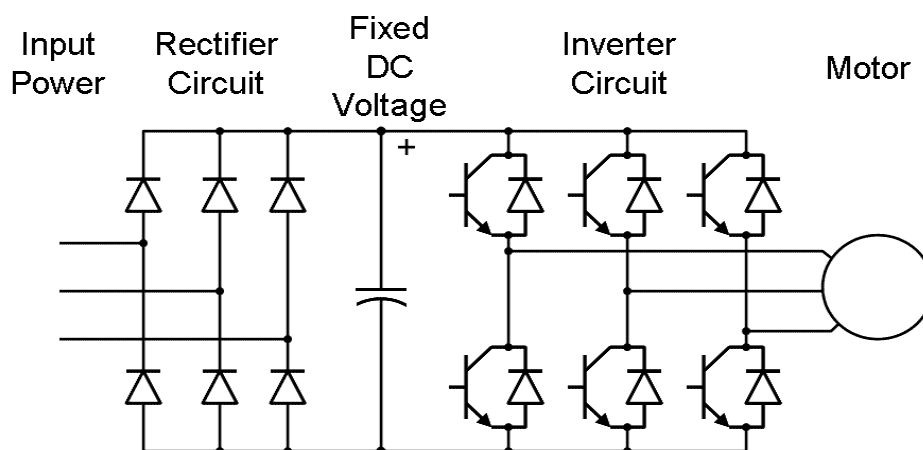


vataajuiseksi vaihtojännitteeksi, joka syötetään moottoreille. Taajuusmuuttajaa käytettäessä saadaan sähkömoottori pyörimään halutulla tavalla, josta on hyötyä prosessin säädössä. Tällä tavoin säästetään energiaa ja sitä oikein käytettynä vähennetään käytön mekaanista rasitusta.

Erilliskäyttötapauksissa taajuusmuuttajalla ohjataan moottoria suoraan kolmivaiheisesta verkosta, kuva 6.2 ja 6.15. Linjakäyttötilanteessa useampi taajuusmuuttaja (invertteri) on kytketty samaan tasajännitevälipiiriin moottoreita ohjaamaan, kuvat 6.3 ja 6.19.

## Rakenne

Taajuusmuuttaja koostuu tasasuuntaajasta, välipiiristä, vaihtosuuntaajasta, ohjauselektronikasta ja suotimista.



Kuva 6.15 Kolmivaiheinen 6- pulssisuuntaaja toteutettuna PWM- tekniikalla (Wikibooks)

Tasasuuntaajan tehtävänä on muuttaa verkkojännite tasajännitteeksi. Tavallisesti suuntaus on toteutettu 6-pulssisella diodisillalla, mutta se on myös mahdollista toteuttaa 12- tai 18-pulssisena tyristoreilla ja tehotransistoreilla. Jos taajuusmuuttajalta tarvitaan verkkojarrutusominaisuuksia, niin tasasuuntausosaa ei voida toteuttaa diodeilla. Tavallisesti taajuusmuuttajat sisältävät välipiirin, mutta on myös vähemmän käytettyjä ilman välipiiriä olevia suoria muuttajia, syklokonverttereita.

Välipiirin päätehtävänä on toimia lyhytaikaisena energiavarastona. Tavallisin toteutustapa välipiirille on jännitevälipiiri, jossa energiavarastona on kapasitanssi (kondensaattoripatteristo). Jänniteohjatun vaihtosuuntaajan lähtöjännite säädetään muuttamalla välipiirin jännitettä tai muuttamalla lähtöjännitteen pulssikuviota PWM-tekniikalla. Virtavälipiirissä energiavarastona käytetään induktanssia. Usein välipiiriin on asennettu kuristin tasoittamaan tasajännitteen muutoksia. Tällainen taajuusmuuttaja toimii virtalähteenä syöttäen moottoriin sellaisen virran, että moottorin navoissa on haluttu jännite. Moottorin virtaa ohjataan tasisuuntaajalla ja jännitettä vaihtosuuntaajalla.

Vaihtosuuntaaja on yleisesti toteutettu puolijohteilla IGBT-tehotransistoreilla. Vaihtosuuntaajan tehtävänä on muokata välipiirin tasasähköstä halutun taajuista vaihtosähköä moottorille. (Hedman 2009.)

### **Ohjaus- ja säätömenetelmät**

Oikosulkukoneen ohjauksessa ja säädössä on käytetty useita menetelmiä. Jännitevälipiirillisten taajuusmuuttajien säätö ja ohjaus perustuu skalaariohjaukseen, skalaarisäätöön, vektorisäätöön tai suoraan momenttisäätöön, DTC-säätöön. Kukin säätömuoto sopii tietynlaiseen käyttösovellukseen.

Kestomagnetoidun tahtimoottorin säätö toteutetaan yleensä joko vektorisäädöllä tai suoralla momentinsäädöllä.

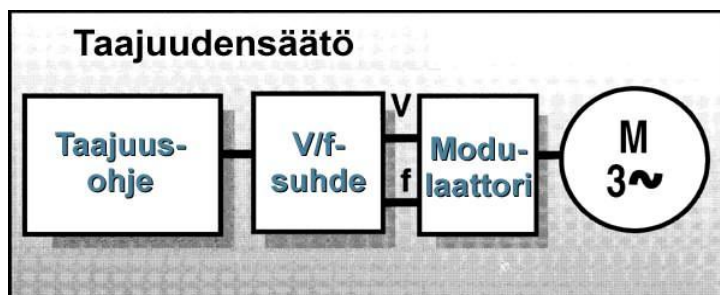
### **Skalaariohjaus**

Edellä mainituista oikosulkumoottorin säätömuodoista skalaariohjaus on halvin ja edullisin toteuttaa. Skalaariohjauksessa moottorin nopeutta ohjataan vaihtosuuntaajasta tulevan taajuuden arvoa muuttamalla. Moottorin saama jännite riippuu lähtötaajuudesta, joka kasvaa lineaarisesti aina nimellistaajuuteen asti, jonka jälkeen se pysyy vakiona. Skalaariohjauksessa koneen ottamaan virtaan ei vaikuteta, vaan se määräytyy kuormituksen mukaan. Mikäli skalaariohjaukseen kytketään takaisinkytkentä, voidaan puhua jo skalaarisäädöstä. (Tekninen opas nro 1.)

## Skalaarisäätö

Skalaarisäädössä moottorin pyörimisnopeutta ohjataan vaihtosuuntaajan lähtötaajuutta muuttamalla, eikä se ota mitenkään huomioon moottorin ominaisuuksia. Tavallisimpia skalaarisäädön kohteita ovat kuljettimet, puhaltimet ja pumput. Skalaarisäädössä säädettäviä suureita ovat lähtöjännite ja taajuus. Skalaarisäätö on yleisin säätötapa, joka ei ota toiminnan kannalta huomioon moottorin kilpiarvoja.

Skalaarisäädöllä voidaan toteuttaa hyvin koko nopeusalueen kattava perussäätö koneelle. Ohjaus perustuu pysyvän tilan kaavoihin ja on siksi hiukan epätarkka muutostilanteissa. Mitä nopeampia momentinmuutoksia tapahtuu, sitä suuremmat ovat skalaarisäädön tekemät virheet. (Tekninen opas nro 1.)



Kuva 6.16 Skalaarisäätö, PWM (Tekninen opas nro 1)

## Vektorisäätö

Vektorisäätö on jo hyvin kehittynyt säätömenetelmä. Vektorisäätö edellyttää tarkkaa nopeuden mittausta. Vektorisäädössä koneen käämivuota ja vääntömomenttia säädetään erikseen samalla periaatteella kuin tasavirtakoneessa. Käämivuohon vaikutetaan magnetointikäädityksellä ja vääntömomenttiin ankkurivirralla. Vektorisäädössä tarvitaan staattorin virta ja roottorin pyörintänopeus, jotta säätö voidaan toteuttaa. Vektorisäätö on laskennallisesti hankala. Siinä tarvitaan roottorivuo-orientointia, jossa staattorivuo jaetaan kahteen erikseen tarkasteltavaan komponenttiin  $I_d$  ja  $I_q$ .  $I_d$  on vuohon nähden yhdensuuntainen vuon säätämiseen tarvittava komponentti ja  $I_q$  on vuohon nähden kohtisuorassa oleva komponentti momentin säätöä varten.

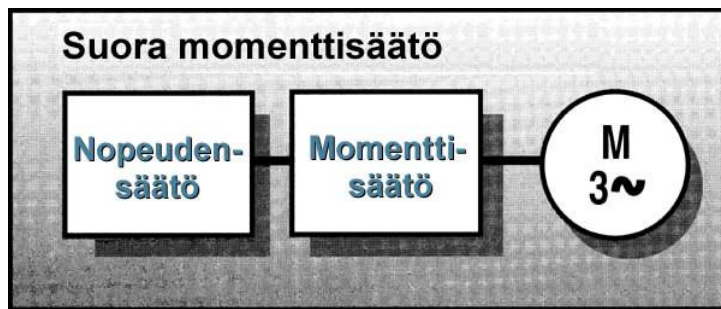
Vektorisäädössä taajuusmuuttaja käyttää hyväkseen sisäistä konekohtaista moottorimallia. (Tekninen opas nro 1.)



Kuva 6.17 Vektorisäätö, PWM (Tekninen opas nro 1)

### Suora momenttisäätö, DTC

DTC on ABB:n kehittämä ohjaustapa moottoreille. DTC-säädössä säädettäviä suureita ovat momentti ja magneettivuo (käämivuo). Lyhenne DTC muodostuu sanoista Direct Torque Control, suora momentinsäätö. Säättöön ei tarvita erillistä jännite- ja taajuusohjattua PWM-modulaattoria, jolloin säätötapahtuma nopeutuu. DTC on periaatteeltaan hystereesisäätö, jossa vuo ja momentti pyritään pitämään tietyn kaistan sisällä valitsemalla tilanteeseen sopiva jännitevektori. Magneettivuolle ja momentille siis asetetaan tietyt rajat, joiden sisällä arvojen täytyy pysyä. Jos rajat ylitetään, suoritetaan korjaustoimenpiteitä. Säädössä jokaisesta vaihtosuuntaajan tekemää kytkentää tarkastellaan erillisenä. Näin ollen suora momentinsäätö vaatii hyvin tarkan matemaattisen mallin ja tehokkaan laitteiston. Vääntömomentti muuttuu aina suurimmalla mahdollisella nopeudella ilman vasteen ylitystä. Suora momentinsäätö ei tarvitse erillistä takaisinkytkentää, vaan taajuusmuuttaja laskee säätöarvot itse, mikä nopeuttaa säädön momenttivastetta. DTC-säätö on tämän hetken kehittynein säätömuoto. (Tekninen opas nro 1.)



Kuva 6.18 Suora momentinsäätö, DTC (Tekninen opas nro 1)

### Toiminta jarruna

Taajuusmuuttajia voidaan käyttää moottorin jarruttamiseen. Tällöin moottori pyörii generaattorina syöttäen taajuusmuuttajalle sen generoimaa energiaa. Energian suunta on tällöin moottorista verkkoon päin. Jarrutuksessa taajuusmuuttajan välipiirin jännite nousee, ja jos jännitettä ei saada pudotettua alas, taajuusmuuttaja laukeaa ylijännitteeseen tai huonossa tapauksessa vaurioituu. Välipiirin varastoitunut energia voidaan syöttää takaisin verkkoon tai muuttaa vastuksissa lämmöksi.

Jos käytetään verkkoon jarrutusta ja hyödynnetään generoitu sähköteho syöttämällä se takaisin verkkoon, täytyy käyttää IGBT-tasasuuntaajaa. Lyhenne IGBT muodostuu sanoista insulated gate bipolar transistor. Jotta IGBT-sillan tekemää pulssijonosta saadaan lähelle sinimuotoista, joudutaan käyttämään kapasitanssista C ja induktanssista L koostuvaa LCL-suodinta. (Hedman 2009; Sepsilva 1997.)

Vastusjarrutustoteutuksessa taajuusmuuttaja tarvitsee jarrukatkoja. Jarrukatkoja yleensä sisältyy taajuusmuuttajaan, mutta voidaan käyttää myös ulkopuolisia katkoja. Vastusjarrutuksessa on tärkeää vastuksen oikea mitoitus sovelluskohteen mukaisesti. Mitoitustilanteessa on tiedettävä vastuksen käyttösykli ja jarrutukselta vaadittava teho. Taajuusmuuttajan manuaaleissa on kerrottu vastusjarrutukseen liittyvät ohmiarvolliset rajat, joiden väliin vastuksen koko tulee osua. Liian pieneksi mitoitettu vastus aiheuttaa liian suuren virran, joka vaurioittaa jarrukatkojaa. Liian suureksi mitoitettu vastus taas ei pysty käyttämään koko jarrutuskapasiteettia. Oikea mitoitus vastuksen tehonkeston ja resistanssiarvon mukaan on tärkeää.

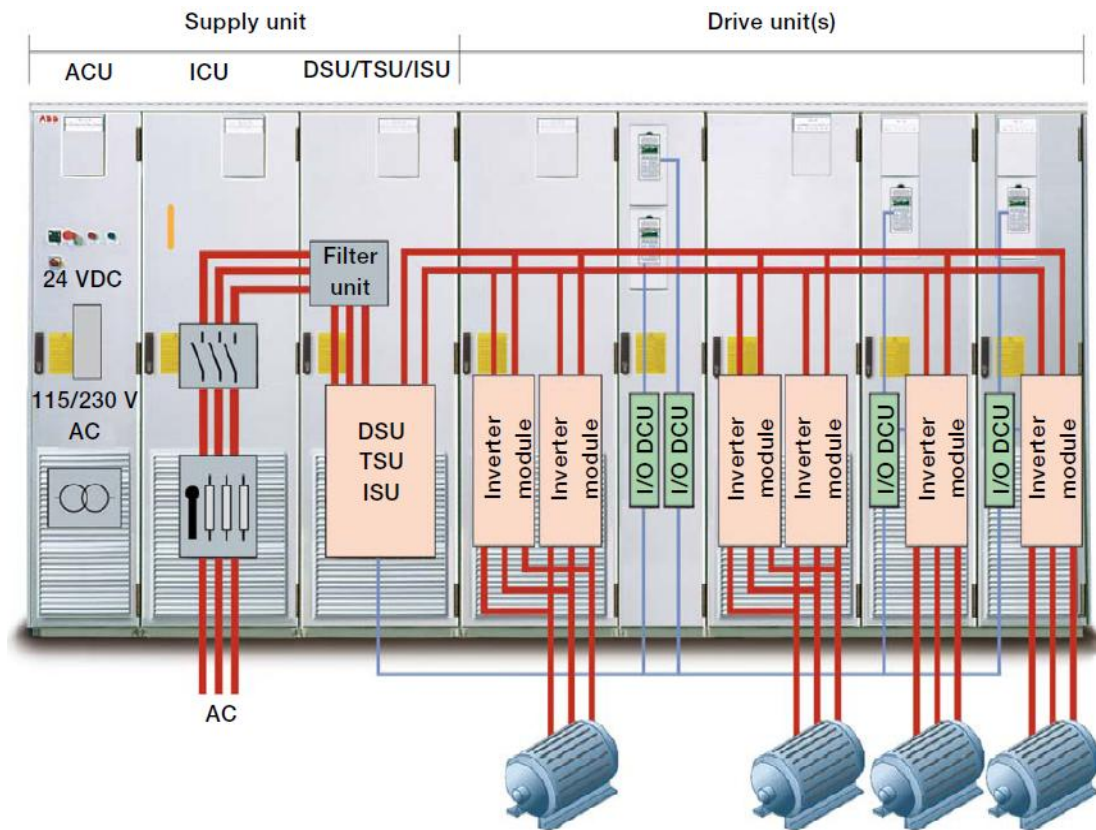
## 6.5 Linjakäyttö

Käytettäessä useita moottoreita voidaan ohjata joko jokaista konetta erikseen tai useita koneita yhtäaikaisesti. Muuttajakäytöt jaetaan tavallisesti linja- ja erilliskäyttöihin.

Jos jokaista konetta ohjataan erikseen omalla taajuusmuuttajalla, niin kaikilla muuttajilla vaikuttaa samanlainen verkkojännite, jolloin puhutaan erilliskäytöstä. Näin ollen jokaisella moottorilla on omat tasasuuntaajat, välipiirit ja vaihtosuuntaajat taajuusmuuttajassa.

Linjakäytössä taajuusmuuttajat, invertterit, liitetään monesti samaan välipiiriin, jolloin yhden moottorin generoimaa energiaa on mahdollista käyttää toisen moottorin hyväksi. Tässä yhteydessä on myös mahdollista käyttää verkkoon jarrutusta tai jarrutusvastuksia.

Linjakäytössä syöttöyksikkö tai erillinen taajuusmuuttajan tasasuuntausosa muuttaa verkkojännitteen tasajännitteeksi, jonka välipiiriin liitetyt taajuusmuuttajat, vaihtosuuntaajat, käyttävät omille moottoreilleen. Linjakäytön etuna on se, että kaikkia käytön komponentteja ei tarvitse tuoda sähkötilaan. (Hedman 2009.)



Kuva 6.19 Linjakäytön rakenne, multidrive (ABB industrial drives)

Linjakäyttö (multidrive) koostuu useita erilaisista yksiköistä. Kuvan 6.19 ABB:n mallin mukaan näistä tärkeimmät yksiköt ovat:

- |                               |                              |
|-------------------------------|------------------------------|
| - käyttöyksiköt               | drive units*                 |
| - diodisyöttöyksiköt          | diode supply units, DSU*     |
| - IGBT- syöttöyksiköt         | IGBT supply units, ISU*      |
| - tyristorisyöttöyksiköt      | thyristor supply units, TSU* |
| - jarruysiköt                 | dynamic braking units, DBU   |
| - ohjausyksiköt (valinnainen) | control units, DCU*          |

\* Linjakäytön osat kuvassa 6.19

*Käyttöyksikkö.* Kondensaattorit tasoittavat välipiirin jännitettä taajuusmuuttajien ja DC-virtakiskon välillä. Käyttöjen sähköliityntä on suojattu sulakkeilla taajuusmuuttajien yhteiseen DC-kiskoon.

Syöttöyksiköitä on kolmea erilaista mallia. On *diodisyöttöyksikkö DSU*, *IGBT-syöttöyksikkö ISU* ja *tyristorisyöttöyksikkö TSU*. Kaikki linjakäytön syöttöyksiköt perustuvat 12-pulssiseen siltaan, jossa AC-verkkojännite muunnetaan DC-tasajännitteeksi välipiiriin. Erot eri syöttöyksiköiden välillä ovat ominaisuuksissa ja siltatyypin valintaan käyttötarkoituksen perusteella.

*Tehonsyöttöyksiköitä* on mahdollista kytkeä kaksi rinnan samaan tasavirtakiskoon. Kuten diodisillat DSU + DSU, IGBT-sillat ISU + ISU tai DSU + ISU. Näin saadaan suurempi teho välipiiriin ja välipiirin kapasiteettia kasvatettua.

*Jarruysikkö*. Moottoreilla jarrutettaessa välipiirin jännite nousee ja tehon kuluun vaihtuu moottoreista sähköverkkoon. Jottei jännitteen noususta välipiirissä aiheudu vahinkoa, on mahdollista käyttää generoitu energia toisten moottoreiden käytettäväksi, purkaa hukkateho jarruvastukseen lämmöksi tai syöttää energia takaisin sähköverkkoon.

*Ohjausyksikkö*. Ohjausyksiköt varustetaan tarvittavilla liitännöillä, virtalähteellä, ohjauspaneelilla ja tarvittavilla automaatiovälineillä. Ohjausyksiköllä voidaan kontrolloida taajuusmuuttajan toimintaa paikanpäällä. (ABB industrial drives.)

## 7 SÄHKÖKÄYTTÖJEN KÄYTTÖHÄIRIÖT

Nykyiset sähkökäytöt ovat luotettavia, ja niiden vikojen esiintymistiheys on varsin pieni. Usein häiriön syy on jossain muualla kuin itse käytössä. Sähkökäytön antama häiriö voi johtua mm. liian suuresta kuormasta tai liiallisesta lämpenemisestä tuuletuksen estyessä. Sähkökäyttöjen pääasiallisena huoltajana vikatilanteessa toimii kunnossapidon sähköalan ammattilainen, mutta käyttäjät voivat itsekin vaikuttaa vikojen esiintymiseen omalta osaltaan. Seuraavassa on kuvailtu tavallisimpia häiriöitä ja niiden syitä.

*a. Tavallisen suoran moottorikäytön ylikuormitussuoja on lauennut, yleensä lämpörele.*

Tavallisesti tilanteeseen joudutaan, jos moottorin kuormitus on kasvanut. Yleensä vian aiheuttaa liiallinen mekaaninen rasitus. Jos kuitenkin epäillään moottoria, mitataan moottoriin tulevien vaihejohtojen jännitteet ja moottorin ot-



tamat virrat joka vaiheesta. Jos ei vian aiheuttaja vielä selvinnyt, mitataan koneesta vielä sen eristysresistanssi. Näillä keinoilla voidaan todeta, onko vika moottorissa.

*b. Säädetyistä sähkökäytöstä tuleva vikailmoitus ilmoittaa ylivirrasta.*

Elektroniikka hälyttää vikaa ja vikaa etsitään ensin laitteesta, moottorista, kaapeleista ja viimeisenä vasta itse käytöstä. Käyttäjän tekemät erilaiset havainnot ajon aikana auttavat mahdollisesti vian selvittämisessä.

*c. Käyttö ei jaksaa käynnistyä.*

Tähän ongelmaan on monia syitä. Mekaniikka voi olla jumissa, pumpattava aine voi olla liian sakeaa, kuljetinhihnalla on liian suuri kuormitus tai kyseessä on jokin muu jumitilanne mekaanisella puolella.

*d. Käyttö ei suostu käynnistymään.*

Syy on käytön ulkopuolella oleva tekijä. Mahdollisesti jokin käytön käynnistämisen estävä lukituspiiri tai jokin ohjainnappi tai hätäseiskeytkin on väärässä asennossa. On hyvä myös hyvä todeta, että sulakkeet ovat varmasti ehjät.

*e. Lyhyt sähkökatko sähköverkossa.*

Pikajälleenkytkennän ansiosta sähkö palaa takaisin 0,4 s:n kuluttua. On tavallista, että laitteet pysähtyvät sähkökatkon aikana, mutta kaikki laitteet eivät lähde takaisin päälle. Syynä voi olla alijännitehäilytyksen kuittaamatta jääminen tai sulakkeiden palaminen. (Knowpap 7.0 2005.)

### **Valta-akseliin liittyvät häiriöt**

Valta-akselikäytön harvoista häiriöistä suurin osa muodostuu mekaanisista tekijöistä. Häiriöt muodostuvat yleensä käyttöjen hihnojen luistamisesta, hihnojen ajautumisesta pois paikoiltaan ja laakereiden rikkoontumisesta. Tarvittavat huoltotoimenpiteet voidaan suorittaa pitkälti kartonkikoneen suunnitellun seisokin yhteydessä. Huoltotoimenpiteissä pyritään ennakoidaan mahdolliset laitteiden rikkoutumiset, jotta ei tapahdu käynnin aikana katkoja aiheuttavia laitevaurioita. Mainitut viat ovat aiheuttaneet vuonna 2010 muutamia raportoituja katkoja tai

suunnittelemattomia seisokkeja. Valta-akseliin liitettyjä tuotannon menetyksiä vuonna 2010 oli kolme, joista aiheutui haittaa 9 h 11 min. Kaikkia järjestelmään kirjattuja kartonkikoneen 1 katkoja ei ole kohdistettu mihinkään tiettyyn katkon aiheuttajaan, vaan ne on yleisesti merkattu tapahtumaksi ”katko” tai ”suunnittelematon seisokki”. Näin ollen valta-akseliin liittyvien katkojen määrä ja aiheutunut tuotannon menetysaika voi olla virheellinen. Tiedot pohjautuvat tehtaan Seitti-raportointijärjestelmään.

### **Muuttajalaitteiston häiriöt**

Taajuusmuuttajat, kuten kaikki muu elektroniikka prosessissa joutuu sietämään monenlaisia häiriöitä. Taajuusmuuttaja voi itse lähettää häiriöitä ja asettua häiriöille alttiiksi. Taajuusmuuttajat on rakennettu siten, että ne sietävät ulkopuolisia häiriöitä hyvin ja niiden toimintavarmuus on nostettu korkealle. Ongelmana on kuitenkin niiden itsensä aiheuttamat häiriöt itselleen ja muille laitteille.

PWM-tekniikalla toimivissa taajuusmuuttajissa IGBT-silloissa bipolaaritransistorit tekevät päälle- ja pois-kytkentöjä nopeasti aiheuttaen häiriöitä. Transistorien muodostamista alle mikrosekunnin mittaisista pulsseista muodostuu merkittävän suuritaajuinen virta, joka leviää ympäristöön aiheuttaen häiriötä.

Tasasuuntaaja aiheuttaa sähköverkkoon harmonisia yliaaltoja ja korkeataajuisia johtuvia häiriöitä. Tämä johtuu siitä, että suuntaajan ottama virta ei ole sinimuotoista. Kuormitusvirta sisältää 50 Hz:n taajuisen virran lisäksi harmonisia taajuuksia, mm. 250 Hz, 350 Hz, 550 Hz ja 650 Hz. Suuntaaja toimii siis eräänlaisena ylivirtageneraattorina syöttäen näitä ylivirtoja. Häiriöistä johtuen verkon jännitteen muoto ei ole enää sinimuotoinen vaan vääristynyt. Epäsinimuotoinen jännite aiheuttaa sähkölaiteissa lisääntynyttä tehonhäviöitä ja häiriöitä. Epäsinimuotoisen virran ja sen yhdessä perustaajuisen jännitteen kanssa muodostamaa tehoa kutsutaan yliaaltoiseksi loistehoksi eli särötehoksi.

Taajuusmuuttajassa tasasuuntaajan ja vaihtosuuntaajan välissä oleva välipiiri ei ole häiriöiden aiheuttajana, vaan sen rakenne vaikuttaa suuntaajasta lähtevien häiriöiden määrään.

Harmonisia taajuuksia joudutaan varsinkin teollisuudessa suodattamaan pois sopivasti mitoitettujen suotimien avulla. Nämä ovat LC-sarjaresonanssipiirejä, jotka viritetään resonanssiin harmonisten yliaaltojen kanssa. Resonanssipiirit absorboivat eli imevät verkkojännitteen yliaaltoja ja parantavat jännitteen käyrämuotoa. Verkkoyhtiöt laskuttavat nykyään suurempia loistehon tuottajia, joten heidän on edullista asentaa yliaaltosuotimia omiin järjestelmiin. (Lilja 2003 & Ruppä 2003.)

Häiriöitä voidaan merkittävästi ehkäistä asentamalla taajuusmuuttaja oikein. Lähinnä tämä tarkoittaa sitä, että käytetään vain EMC-käyttöön sopivia, suojattuja ja oikean pituisia kaapeleita. Lyhenne EMC tulee sanoista electromagnetic compatibility. EMC-direktiivin mukaisien laitteiden toiminta ei häiritse muita laitteita, eivätkä suojatut laitteet kärsi muiden laitteiden aiheuttamasta häiriöstä. Hankalissa tilanteissa taajuusmuuttaja on mahdollista asentaa Faradayn häkkiä muistuttavaan kaappiin, missä häiriösäteily sitoutuu kaapin seinärakenteisiin. On olemassa myös erilaisia suotimia moottorin ja verkon puolelle. Verkon puoleisilla suotimilla ehkäistään verkkoon kulkeutuvat häiriövirrat. Välipiirin rakenteella voidaan vaikuttaa ehkäisevästi häiriövirtoihin. Suotimilla voidaan parantaa muuttajien ominaisuuksia standardien mukaiseksi. (Rouhiainen 2010.)

## **8 SÄHKÖKÄYTÖN VALINTA- JA MITOITUSTEKIJÄT**

Kartonkikoneen käytöiltä vaaditaan riittävän suurta voimaa pyörittämään suuren hitausmomentin teloja sekä pitämään kartonkiraina sopivan kireänä oikealla pyörimisnopeudella. Kartonkikoneissa tehontarve määräytyy joko kiihdytysaikojen perusteella tai raskaissa käytöissä nimellistoimintapisteen perusteella. Ras-kaita käyttäjä ovat mm. viiraosan, puristinosan ja kalanterien käytöt. Kuiva-tusosalla käyttöjen momentintarve on verraten pieni ja tehontarve määräytyy kiihdytys- ja hidastusaikojen perusteella. (Tiainen 2001.)

Kuivausryhmillä on yleisesti suuri hitausmomentti ja käynnistyksessä vaaditaan moottorilta suurta momenttia. Tällaisilla käytöillä moottorit valitaan em. kartonki-koneen kiihdytysaikojen mukaan. Hitausmomentilla on verraten suuri vaikutus momentintarpeeseen. Kuivausryhmille voi poikkeustilanteessa muodostua run-saasti lauhdetta, joka vaikuttaa momentintarpeeseen todella paljon. Lauhteen

muodostuminen on yleistä kuivaussylintereihin, mutta jos lauhteen poistomekanismi vaurioituu, niin lauhde jää sylinterin sisään rasittamaan käyttöä. Lauhteen vaikutus käynnistystilanteessa on merkittävä. Mikäli lauhdetta on riittävästi, ei moottori välttämättä jaksa käynnistyä. Lauhteen muodostumisesta on kerrottu lisää liitteessä 5.

Raskaissa käytöissä kuten puristinosan käyttöillä momentintarve on erilainen. Pyöritettävää massaa ei ole yhtä paljon kuin kuivausrhymillä, mutta puristiosalla puristinnipit ja kaavarit muodostavat suuren momentintarpeen. Puristinnippi muodostuu kahdesta telasta, joista ylätelaa painetaan vasten alatelaa, ja niiden välistä kartonkirata ja puristinhuopa kulkevat aiheuttaen suuren momentintarpeen. Kaavarit ovat tietynlaisia puhdistuslaitteita ryhmässä. Ne nimensä mukaan ”kaapivat” ylimääräisiä ainesosia pois telasta, jolloin aiheutuu lisäkuormaa käytön moottorille.

Kartonkikoneelle moottoreita valittaessa on tapana käyttää sähkökäyttöjen mitoitusohjelmaa. Tällaisia ohjelmia käyttävät mm. yritykset, jotka mitoittavat ja toimittavat sähkökäyttöjä teollisuudelle, kuten Metso Paper ja ABB. Ohjelmiin syötetään kartonkikoneen sähkökäyttöjen mitoitukseen vaadittavat tiedot tarkasti, jonka jälkeen ohjelma laskee tietojen perusteella tarvittavat moottoritehot, RDC-tehot. On mahdollista myös tehdä moottoreiden mitoituslaskenta käyttäen kokeellista menetelmää. Käyttö laitetaan pyörimään tiettyä nopeutta ja katkaistaan sähkönsyöttö moottorilta. Tästä lasketaan aika joka kuluu ryhmän pysähtymiseen ajonopeudesta. Hidastusajan ja ryhmän massan mukaan pystytään määrittämään käytön tarvitsema moottoriteho. Käyttöjen mitoitukseen vaikuttavia tekijöitä on mainittu seuraavassa kappaleessa enemmän.

## **8.1 Käytön mitoitus**

Mitoitettaessa käyttöä on tunnettava koko mekaanisen systeemin hitausmomentti, joka on selvitettävä laskemalla. On tiedettävä telojen, sylintereiden, akselien, kytkinten ja vaihdelaatikoiden hitausmomentit. Tiedot saa valmistajilta ja laskemalla ne yhteen saadaan yhteishitausmomentti, josta saadaan laskettua tarvittava vääntömomentti. Lisäksi on otettava huomioon myös kartonkirainan kireys ja kitka, jotka vaikuttavat käytön tehontarpeeseen. Tietojen perusteella

voidaan mitoittaa moottori ja koko tarvittava käyttö. Jatkuvassa ajossa tehontarve muuttuu ajettavan kartonkilaadun neliögrammapainon mukaan. (Tiainen 2010.)

## 8.2 Kuormitusvääntömomentti

Mitoitettavan moottorin kokoon vaikuttaa tarvittava vääntömomentti  $M$  eli tehon  $P$  ja nopeuden  $n$  välinen suhde, kaava 8.1. Tämä mitoittaminen tekee sellaiset ratkaisut edulliseksi, joissa moottorin pyörimisnopeus on suuri. Taajuusmuuttajalla ohjattuna moottorin maksimimomentti voidaan saavuttaa jo pienillä kierrosnopeuksilla, mutta jos moottorin momentti ei riitä, joudutaan käyttämään vaihdetta moottorin ja kuorman välillä. Vaihteella vaikutetaan kuormalle vaikuttavaan momenttiin ja pyörimisnopeuteen välityssuhteen mukaan.

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2\pi n} \quad (8.1)$$

## 8.3 Moottorin mitoitus ja vastamomentti

Moottorikäyttö mitoitetaan kuormitusmomentin  $M_1$  mukaan. On olemassa erilaisia kuormatyppejä. Yleisimpiä kuormalajeja on sellaisia, joissa:

- momentti pysyy vakiona  $M_1 \leq M_n$  tai
- momentti on suoraan verrannollinen pyörimisnopeuteen  $M_1 \sim \omega$  tai
- momentti on verrannollinen pyörimisnopeuden neliöön.  $M_1 \sim \omega^2$
- momentti on kääntäen verrannollinen pyörimisnopeuteen  $M_1 \sim 1/\omega$ .

Kartonkikoneella hitausmomentti  $J$  on suuri ja kiihdytysaika on verraten lyhyt, jolloin hitauden aiheuttama vastamomentti nousee ratkaisevaksi tekijäksi. Tällöin voidaan todeta, että

$$M_1 = J * \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (8.2)$$

Käytännössä vastamomentti muodostuu erityyppisten momenttien yhdistelmistä ja on jaksollinen. Vastamomenttikäyrän avulla voidaan laskea erilaisia tilanteita vastaavat virrat ja niiden avulla moottorin terminen kuormitus. Moottoria valittaessa on otettava huomioon myös, että moottorityyppi vastamomentiltaan on

jaksolliselle käyttötavalle leimattu ja että alhaisilla pyörimisnopeuksilla tuuletus saattaa olla mitoitusmekanismi, ellei käytetä erillistä jäähdytyspuhallinta. (ABB Group 2000.)

Yleensä joudutaan käyttämään vaihdetta käyttömoottorin ja kuormituksen välillä. Moottorin akselille redusoitu kuormitusväntömomentti muuttuu suoraan verrannollisena välityssuhteeseen ja massahitausmomentti muuttuu verrannollisena välityssuhteen neliöön. (Arjas 1983.)

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{M'}{M} \quad (8.3)$$

jossa  $n_2$  on kuorman nopeus,  $n_1$  moottorin nopeus,  $M'$  redusoitu väntömomentti ja  $M$  kuorman väntömomentti.

$$\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 = \frac{J'}{J} \quad (8.4)$$

jossa  $J$  on kuorman massahitausmomentti ja  $J'$  redusoitu massahitausmomentti. (Neuvonen 2001.)

Liitteessä 5 on havainnollistettu käsin laskemalla koneen kolmannen kuivausryhmän momentintarve käynnistystilanteessa. Käynnistys tapahtuu nollasta nopeuteen 600 m/min 120 s:n tasaisella kiihdytyksellä. Moottorit joudutaan mitoittamaan kartonkikoneilla momentintarpeen mukaan suuren hitausmassan omaavissa käytöissä.

#### **8.4 Moottorin syöttölaitteiden mitoitus**

Tavallisesti moottorin syöttölaitteistot mitoitetaan moottorin nimellisvirran mukaan. Yleensä vielä niin, että moottorin vaihto kokoa suurempaan on mahdollista. Nykyään syöttölaitteisto perustuu tehoelektroniikkaan ja sen myötä elektronikan mitoituksen tulee perustua kuormitusvirran ajalliseen vaihteluun ottaen huomioon niiden termiset aikavakiot. Näin vältetään kuormitusvirtahuippujen aiheuttamilta vahingoilta. (ABB Group 2000.)

## Taajuusmuuttajan valinta ja mitoitus

Taajuusmuuttajan valintaan tarvitaan seuraavat tiedot: verkon jännite ja taajuus, ohjattavan moottorin teho ja sen nimellisvirta, moottorin kuormitusprofiili, muuttajan kotelointiluokka, EMC-vaatimus sekä mahdolliset lisävarusteet ja erityisvaatimukset. Ennen taajuusmuuttajan valintaa käytön mitoitus lähtee pyöritettävän käytön sähkömoottorin valinnasta. Valittavissa on useita käyttöjen mitoitusohjelmia eri valmistajilta.

Taajuusmuuttaja tulee sijoittaa sopivaan paikkaan suhteellisen lähelle moottoria. Tavallisesti teollisuudessa on kuitenkin erillisiä sähkötiloja, joihin tämän tyyppiset laitteet sijoitetaan. Joskus on kuitenkin järkevämpää sijoittaa taajuusmuuttaja itse prosessitilaan, jolloin laitteen suojauksella on merkitystä.

Seuraavassa on muutamia esimerkkejä laitteiden kotelointiluokista:

- IP00/20 kaapitettava moduuli
- IP21 sähkötilaan asennettava laite
- IP54/55 voidaan asentaa prosessitilaan tietyin varauksin.

IP-luokituksessa ensimmäinen numero kertoo suojauksen vieraita esineitä vastaan ja toinen numero suojauksen kosteutta vastaan. Yleensä on pyrittävä sijoittamaan laite mahdollisimman siistiin ympäristöön. (ABB Group 2000.)

### 8.5 RDC ja NRL

Sähkökäytön tehoelektroniikan sekä moottoreiden mitoitusperusteena käytetään laitteen toimittajan ilmoittamaa RDC-tehoa (Recommend Drive Capacity) ja NRL-tehoa (Normal Running Load). RDC tarkoittaa käyttöpiirteen mitoitus-tehoa ja NRL tarkoittaa käyttöpiirteen normaaliajotehoa, joka on luonnollisesti pienempi kuin RDC-teho. RDC-tehontarve on kartonkikoneen laitteen toimittajan ilmoittama vaatimus, joka perustuu asiakkaan tilauksessa esittämiin ja vaatimiin ehtoihin.

Yleensä RDC-tehot lasketaan varmuuskertoimella hiukan yläkanttiin. Kerrointa käyttämällä varmistutaan, että sovitut mitoitus ehdot täyttyvät varmasti. Alimitoi-

tus olisi paha virhe. Liika ylimitoittaminen ei myöskään ole järkevää. Tämä tulisi asiakkaalle kalliiksi. (Tiainen 2001.)

## **9 SUORITETUT MITTAUKSET**

Aiemmin on tehty selvitys Metso Paper -yhtiössä valta-akselin käyttöjen moottoritehoista lähtökohtana nopeuden nosto viiraosan mitoitettuun nopeuteen. Moottoritehojen arviointia on tehty Metson laskentaohjelmalla pohjautuen kuivaussyntereiden inertiaan. Selvityksessä määritettiin kartonkikoneen kaikkien käyttöjen muuttuvat RDC-moottorimitoitustehot nopeuden noston myötä.

Myös ABB on tehnyt kokeellisia mittauksia, jonka lähtökohtana on ollut valta-akselin poisto ja nopeuden nosto viiraosan mitoitettuun nopeuteen 600 m/min. Moottoreiden mitoituksessa on otettu huomioon tuotteen neliömassat, hidastus- ja kiihdytysajat, hitausmomentit mittauksin sekä poikkeustilanteessa kuivatusryhmillä esiintyvät vesilastit. Moottoreiden mitoitus ja tehojen arviointi perustuu tehtyihin mittauksiin kahdella erilaisella ajettulla neliögrammapainolla 310 g/m<sup>2</sup> ja 180 g/m<sup>2</sup>. Jokaiselle kuivausryhmälle erikseen on tehty kiihdytys- ja hidastusmittaukset ryhmä kerrallaan hitausmomentin määrittämistä varten.

Metso Paper -yhtiön laskemia ja ABB:n arvioimia RDC-moottorimitoitustehoja käytetään lähtökohtana käyttöjen valinnassa.

### **Huomioitavaa mitoituksessa**

Mitoituksessa on otettava huomioon tarvittaessa yli 400 g/m<sup>2</sup> ajettavat kartonkilaadut. Nykyään pystytään ajamaan maksimissaan 420 g/m<sup>2</sup> tuotetta. Koneelle on tulossa formeri, joka täytyy ottaa mitoituksessa huomioon. Mahdolliset lauhteen muodostumiset vaikuttavat suuresti tarvittavaan moottoritehoon. Liitteessä 5 on pohdittu lauhteen tuomaa vaikutusta momentin tarpeeseen.

### **Moottoreiden mitoitus kartonkikoneen käytöille**

Moottorit ovat mitoitettu kartonkikoneen käytöille laskennallisten RDC-mitoitustehojen mukaan. Liitteessä 2 on listattuna kartonkikoneen nykyinen käyttöjen moottorikanta sekä mitoitettut RDC-moottoritehot nopeuden noston



seurauksena. Metso Paper on mitoittanut tarvittavat moottoritehot aikanaan ratanopeudelle 600 m/min, joten ne soveltuvat hyvin myös nykyisessä tilanteessa. Liitteen RDC-moottoritehot ovat Metson mitoittamia arvoja.

Liitteen 2 taulukossa on esitetty myös käytössä olevien tasavirtamoottoreiden ja uusien oikosulkumoottoreiden hyötysuhteet. Tasavirtamoottoreiden hyötysuhteet ovat laskettu kaavalla (10.2) moottorin nimellistehon sekä magnetointi- ja ankkurijännitteen ja -virran mukaan. Mitoitettuihin RDC-tehoihin on valittu ABB:n standardimoottoreiden tuoteluettelosta vastaavan teholumen hyvän hyötysuhteen oikosulkumoottoreiden hyötysuhteet esimerkkiarvoiksi, joita voi karkeasti verrata vanhojen moottoreiden hyötysuhteisiin. Käytännössä kaikki oikosulkumoottoreiden hyötysuhteet ovat parempia kuin vastaavat vanhojen moottoreiden arvot.

Liitteessä 5 on kerrottu momentintarpeen muodostumisesta kartonkikoneen kuivausryhmille. Liitteessä on laskelma, joka on karkea arvio johtuen osittain puutteellisista lähtötiedoista, mutta laskelma antaa kuvan laskentatavasta, laskentaan vaikuttavista osatekijöistä ja suurimman painoarvon tekijöistä. Lauhteen vaikutusta ei laskelmassa oteta huomioon, vaan arvioidaan sen vaikutusta mitoituskeleihin teoriassa.

## **10 MOOTTOREIDEN ENERGIATALOUS**

Jokaisella moottorilla on sille sen ominainen hyötysuhde. Osa moottorin verkosta ottamasta sähköenergiasta muuttuu lämpöenergiaksi, joka poistetaan jäähdyttämällä. Pienitehoisissa alle 1-2 MW:n koneissa jäähdytysaineena on ilma ja suuremmissa koneissa pääsääntöisesti neste. (ABB Group 2000.)

### **10.1 Hyötysuhde**

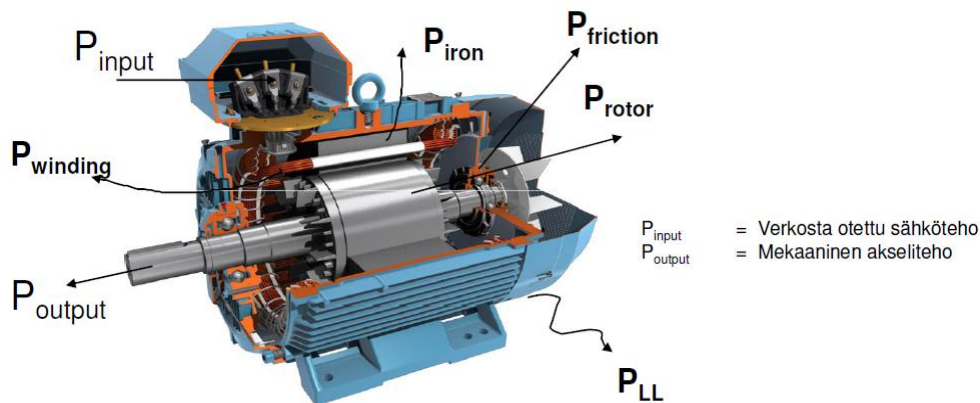
Hyötysuhde on moottorin akselilta saatavan mekaanisen tehon ja moottorin sähköverkosta ottaman sähkötehon suhde. Suuri hyötysuhde tarkoittaa, että moottori pystyy muuttamaan tehokkaasti verkosta otetun tehon mekaaniseksi tehoksi.

$$\eta = \frac{P_{Output}}{P_{Input}} \quad (10.1)$$

Standardikoneissa hyötysuhteen kasvaminen yhdellä prosenttiyksiköllä perustellee 20–25 % kalliimman hankintahinnan varsin laajalla tehoalueella. Tämä tulee ottaa huomioon, kun moottoreita valitaan käytölle. Kalliimpi ja paremmalla hyötysuhteella oleva moottorivaihtoehto tulee kannattavammaksi verrattuna edulliseen huonon hyötysuhteen omaavaan koneeseen. Mitä suurempitehoinen moottori on, sitä suuremman hyötysuhteen kone on tavallisesti kyseessä. (ABB Group 2000.)

## 10.2 Häviöt

Sähkömoottori ottaa verkosta enemmän sähköenergiaa kuin mitä se tuottaa mekaanista energiaa. Osa energiasta kuluu erilaisiin häviöihin.



Kuva 10.1 Sähkömoottorin häviöiden määrittely (Kortelainen 2010)

Sähkömoottorin häviöt  $P_{\text{häviöt}}$  muodostuvat seuraavista tekijöistä. Häviöiden painoarvo vaihtelee tarkasteltavan konetyypin, tehon, luokituksen ja valmistajan mukaan.

- |                                    |                         |
|------------------------------------|-------------------------|
| - tuuletin, kitka ja laakerihäviöt | $P_{\text{friction}}^*$ |
| - staattorin rautahäviöt           | $P_{\text{iron}}^*$     |
| - staattorin kuparihäviöt          | $P_{\text{winding}}^*$  |
| - roottorin rauta- ja kuparihäviöt | $P_{\text{rotor}}^*$    |
| - lisähäviöt                       | $P_{\text{LL}}^*$       |

\*Kuvassa 10.1 esiintyvät merkinnät.

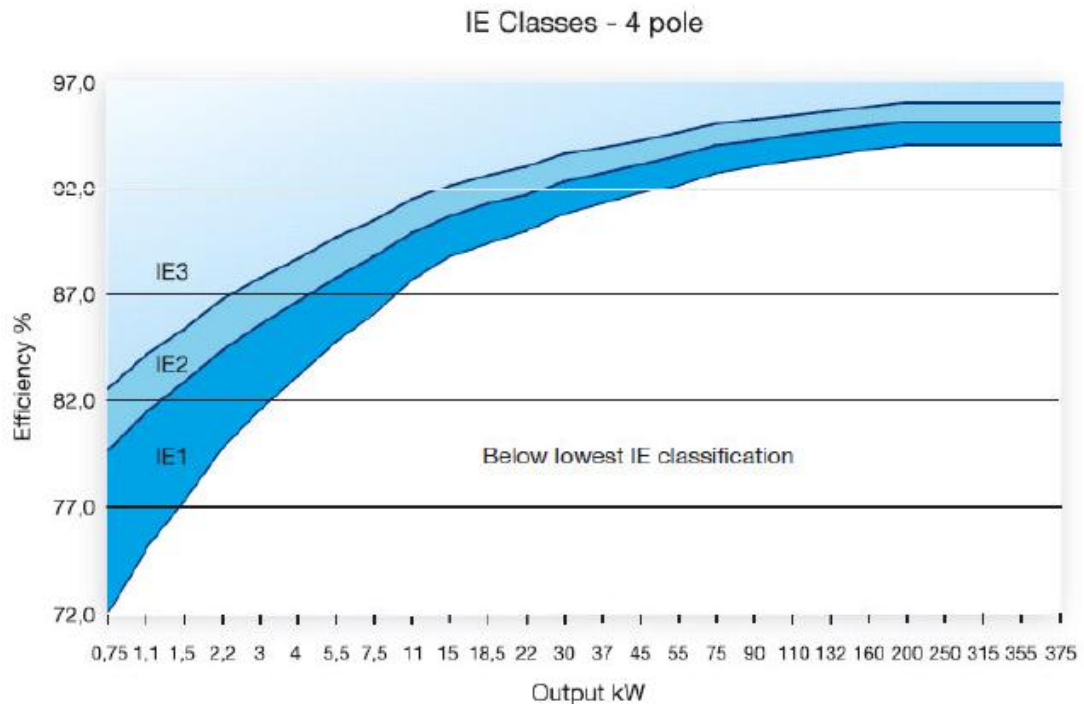
Moottorin mekaaninen akseliteho  $P_{\text{output}}$  saadaan, kun moottorin verkosta ottamasta tehosta  $P_{\text{input}}$  vähennetään häviöiden muodostama  $P_{\text{häviöt}}$  osuus. (Kortelainen 2010.)

### 10.3 Standardointi

Aikaisemmin käytössä oli EFF-luokitukseen pohjautuva standardi, jonka on korvannut nykyään käytössä oleva maailmanlaajuinen standardoitu hyötysuhdeluokitus standardissa IEC 60034-30 (hyväksytty 2008). IE-luokitus kattaa 2-, 4- ja 6-napaiset koneet tehoalueella 0,75 kW – 375 kW jännitealueen ollessa alle 1000 V ja taajuuden 50 Hz tai 60 Hz.

Moottorit leimataan IE-hyötysuhdeluokituksessa (International Efficiency) hyötysuhteen mukaan seuraavasti:

- IE1 (Standard)
- IE2 (High)
- IE3 (Premium)
- tuleva IE4 (Super Premium)



Kuva 10.2 IE-hyötysuhdeluokat 4-napaisille 50 Hz moottorille (Kortelainen 2010)

Luokituksen perusteella on helpompi valita paremman hyötysuhteen omaava kone. Vanhat EFF3 luokituksen mukaiset koneet ovat poistuneet jo Euroopan markkinoilta, vaikka käytössä olevista koneista niitä on vielä 70 %. EFF3 luokan koneet eivät yltäneet nykyisen standardin IE1 tasolle. (Kortelainen 2010; SLO 2010.)

EU on asettanut markkinoille asetettaville moottoreille hyötysuhdevaatimuksia, jotka kiristyvät tietyin määrajoin. Tarkoituksena on saattaa markkinoille entistä paremmalla hyötysuhteella toimivia energiatehokkaita koneita.

#### 10.4 Elinkaarikustannukset

Vertaillaan kahta samanlaista 120 kW tehoista standardia oikosulkumoottoria, joiden hyötysuhteet ovat 95 % ja 96 %. Oikosulkumoottoreiden rinnalle otetaan vertailuun mukaan kestmagnetoitu tahtimoottori. Kestomagnetoidun tahtimoottorin hyötysuhde on parempi kuin vertailtavien oikosulkumoottoreiden. Näin ollen oletetaan, että tahtikoneen hyötysuhde on 97 %, joka on hyvä arvio ja yhden prosenttiyksikön parempi kuin paremman oikosulkukoneen vastaava arvo.

Oletetaan, että oikosulkumoottoreiden hankintahinnat ovat taulukon mukaiset ja hinnoissa on 25 %:n ero, jolloin ohjemitoituksen mukaan vielä paremman hyötysuhteen moottori on järkevä sijoitus. Kestomagnetoidut tahtikoneet ovat suhteellisen kalliita ja arvioidaan vertailun koneen hinnaksi 20 000 €, joka on suuntaa antava arvo. Tahtikone on tässä vertailussa huomattavasti kalliimpi kuin vertailun muut moottorit.

Energian hintana käytetään 70 €/MWh ja vuotuisena käyttöaikana 8000 tuntia. Tällä hetkellä energian hinta on pienempi, mutta oletetaan hinnan kallistuvan jatkossa yleisen kehityksen myötä. Varaosakustannuksiin ei oteta kantaa laskelmissa.

Taulukko 10.1 Moottoreiden tekniset tiedot ja vuosikulutukset

	Kestomagnetoitu tahtimoottori	Oikosulkumoottori 1	Oikosulkumoottori 2
$P_{\text{otto}}$ (kW)	123,7	125	126,3
$P_{\text{anto}}$ (kW)	120	120	120
$\eta$ (%)	97	96	95
hankintahinta (€)	20000	10000	7500
käyttöaika / v	8000	8000	8000
kulutus MWh / v	990	1000	1010
kulutus € / v	69280	70000	70740

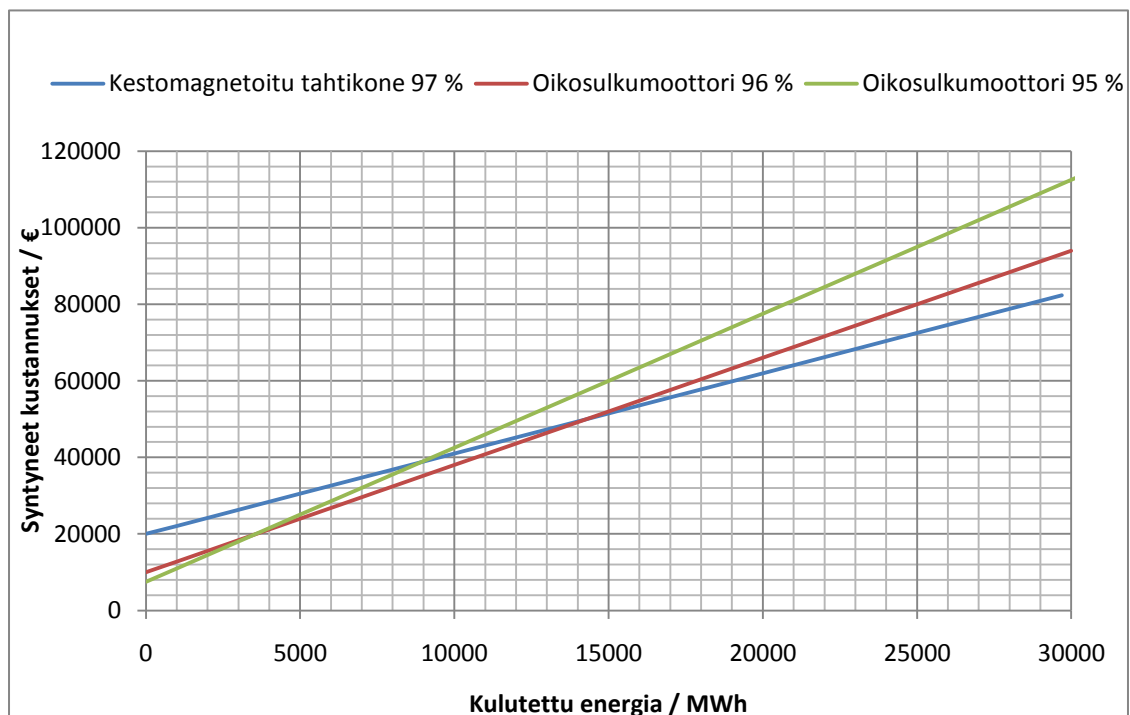
Laskelmassa tehdään sellainen oletus, jossa moottoreita käytetään 120 kW:n nimellisellä teholla koko ajan. Moottoreiden todellisiin kulutuksiin vaikuttaa niiden todellinen käyttöaste, kuormitus ym. tekijät. Laskelmista saadut tulokset ovat näin ollen maksimaalisia kulutuslukemia, joihin ei välttämättä päädytä normaalitilanteessa.

Taulukko 10.2 Moottoreiden hukkaenergioiden suuruudet

	vuosi / €	30 vuotta / €
Kesmagnetoitu tahtimoottori 97 %	2078	62328
Oikosulkumoottori 96 %	2800	84000
Oikosulkumoottori 95 %	3570	107100

Oikosulkumoottoreiden välinen hankintahintaero on 2500 €, ja taulukon 10.2 mukaan yhden vuoden aikana kertyy moottoreiden välisestä hukkaenergiaeros-

ta 770 €:n summa. Näin ollen korkeamman hyötysuhteen oikosulkumoottori ajaisi hankintakustannuseron kiinni reilussa kolmessa ja puolessa vuodessa. Kestomagnetoidun tahtimoottorin etu vuoden aikana on paremman hyötysuhteen oikosulkumoottoriin yli 700 €. Hankintahinnaltaan tämä moottori on verrattain kallis paremman hyötysuhteen oikosulkumoottoriin nähden, mutta tahtimoottori ajaa hintaeron kiinni reilussa 13. vuodessa. Seuraavasta kuvasta 10.3 nähdään hyötysuhteiden merkitys tuotettujen kustannusten ja käytetyn energian suhteesta.



Kuva 10.3 Moottoreiden hyötysuhteiden vaikutus kustannuksiin

Kuvassa 10.3 on vertailtavana 120 kW:n moottoreiden kustannuksia 30 vuoden aikana. Tässä tarkastellut kustannukset muodostuvat moottorin hankintahinnasta ja vuotuisista häviöihin kuluneesta energiasta ns. hukkaenergiasta. Kuvassa kulutettu energia on moottorin kokonaisenergian kulutus (häviöt ja hyöty). Kuvan 10.3 kustannukset eivät sisällä moottoreiden hyötykäytön kustannuksia.

Kuvan 10.3 perusteella on järkevää investoida paremmalla hyötysuhteella olevaan moottoriin, vaikka se on hankintahinnaltaan kalliimpi. Teorian mukaan alle 25 %:n hankintahintaero on vielä perusteltavissa paremman hyötysuhteen koneen hankinnassa, jota pidetään perussääntönä standardikoneilla. Tosin pitkäl-

lä käyttöajalla kallis kestopagnetoitu tahtimoottori on lopulta vertailun edullisin laite.

Korkean hyötysuhteen koneilla saavutetaan pidempi elinikä, parempi luotettavuus, pidemmät huoltovälit sekä pienempi lämmöntuotto.

Karkeasti sanottuna mitä suurempi moottori on, sen parempi hyötysuhde. Oikosulkumoottoreista alle 10 kW:n koneilla harvoin saavutetaan kovin korkeaa hyötysuhdetta, mutta suurilla 1000 kW:n koneilla yli 96 %:n hyötysuhde on normaali saavutus.

Taajuusmuuttajilla hyötysuhteet ovat samaa luokkaa suurien moottoreiden kanssa, mm. ABB:n valmistama taajuusmuuttaja ACS800-01 98 %:n hyötysuhteella. (ABB asiakaslehti; ABB ACS800 3/2009; ABB Group 2000; Kortelainen 2010.)

### **10.5 Moottorikäyttöjen energiatehokkuus teollisuudessa**

Teollisuuden sähkömoottorit ovat suurin yksittäinen sähkönkuluttaja. Suomessa keskimäärin 60 – 70 % teollisuuden sähköntarpeesta kuluu sähkömoottoreissa. Vuonna 2006 teollisuuden osuus kulutuksesta oli 39 TWh.

Normaaleissa olosuhteissa sähkömoottorit ovat luotettavia, tehokkaita, pitkäikäisiä ja selviävät vähällä kunnossapidolla. Väärin käytettyinä ja -huollettuina moottoreiden tehokkuus laskee merkittävästi.

Moottoriratkaisujen sähkönkulutusta voidaan pienentää vaihtamalla moottori uuteen ja energiatehokkaaseen vaihtoehtoon, investoimalla taajuusmuuttajiin sekä kiinnittämällä huomiota moottoreiden käyttöön.

### **Energiatehokkuuden parantaminen**

Aluksi on suoritettava kuvaus järjestelmästä, jossa kuvataan moottoreiden tiedot ja käyttötarkoitukset, nopeussäädön ja vaihteiston tyyppi, aikaisemmin tehdyt investoinnit ja moottorin käyttötunnit vuodessa. Lisäksi voidaan selvittää toimintaparametreja sekä järjestelmän tehokkuus.

Kun lähtötilanne on selvillä, pystytään määrittämään tarvittavat toimenpiteet energiatehokkuuden parantamiseksi. Moottorijärjestelmän energiatehokkuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat

- moottorikuormituksen pienentäminen
- moottoreiden hyötysuhde
- järjestelmän mitoitus
- moottorin käytön laatu
- sähköverkon laatu ja sen yliaallot
- laitteiden kunnossapito.

Moottorin käytöstä riippuen tulee miettiä, mikä on järkevin energiatehokkuuden parantamisvaihtoehto suhteessa kustannuksiin. Seuraavassa taulukossa on esitetty uudistusten tuomia säästömahdollisuuksia (Federley 2009).

Taulukko 10.3 Mahdollisia moottorijärjestelmän energiatehokkuuden parantamistoimenpiteitä

	Parantamistoimenpide	Säästö %
prosessin suunnittelu ja uudistaminen	energiatehokas moottori	2..8
	käytön oikea mitoitus	1...3
	moottoreiden korjaus	0,5...2
	nopeussäätöinen käyttö	...50
	tehokas vaihteisto	2...10
	sähköverkon laatu	0,5...3
prosessin käyttö	voitelu ja säätö	1...5

Kartonkikoneen käyttöihin verrattaessa suurimman hyödyn säästöissä tuo taulukon 10.3 mukaan nopeussäätöinen käyttö, tehokas vaihteisto ja energiatehokas moottori. Kun huomioidaan kartonkikoneen nykytilanne, edellä mainitut asiat huomioiden voidaan säästää huomattavasti vanhoihin sähkömoottorijärjestelmiin verrattuna.

## 10.6 Talousnäkökulma

Liitteessä 2 on esitetty uusien epätahtimoottoreiden hyötysuhteita ABB:n standardimoottoreiden mukaan kartonkikoneen käytöille mitoitetuille moottoritehovaatimuksille. Kestomagnetoitujen tahtimoottoreiden hyötysuhteita ei ollut hyvin



saatavilla, joten niitä ei taulukkoon ole laitettu. Tahtimoottoreiden hyötysuhteet ovat jonkin verran parempia verrattuna epätahtimoottoreihin. Hyötysuhteet ovat suuntaa antavia, mutta ovat parempia kuin käytössä olevien tasavirtamoottoreiden hyötysuhteet. Liitteen 2 DC-moottoreiden hyötysuhteet ovat laskettu kaavalla 10.2 ja muutettu prosenteiksi.

$$\eta = \frac{P_{anto}}{P_{otto}} = \frac{P_{anto}}{U_n * I_n + U_m * I_m} \quad (10.2)$$

AC-moottoreiden hyötysuhteet on laskettu vastaavasti kaavalla (10.3).

$$\eta = \frac{P_{anto}}{P_{otto}} = \frac{P_{anto}}{\sqrt{3} * U_n * I_n * \cos\varphi} \quad (10.3)$$

Valta-akselin poistuessa sen tilalle tulee jokaiselle käytölle uudet moottorit, samoin kaikki vanhat DC-moottorit korvataan uusilla laitteilla. Uusien moottoreiden osalta hyötysuhteet paranevat, mutta toisaalta kun moottoritehot kasvavat nopeuden noston myötä, niin energian kulutuskin kasvaa. Tästä mahdollisesti seuraa kartonkikone 1 sähkökäyttöjen syöttömuuntajan T73 kapasiteetin loppuminen.

Moottoreiden tehontarve kasvaa eniten kuivausryhmillä ja viiraosalla. Valta-akselin poistuessa tarvitaan moottorit jokaiselle käytölle erikseen, sekä puristinosan puristimien käytöille. Kalantereiden tehontarpeen muutos ei ole merkittävä, sillä niiden tehontarpeen optimointi on mahdollinen.

Kartonkikoneen energian kulutus on nykyään noin 8 MWh tunnissa. Vuonna 2010 koneen tuotantoaika oli 7 653,1 tuntia, jolloin energiankulutukseksi muodostuu 61 225 MWh. Koneen mainittu tehonkulutus muodostuu koko koneen kuluttamasta sähköenergiasta jauhimilta pituusleikkurille. Keskiarvallisesti koneen käyttämällä 1 MWh sähköenergiaa saadaan tuotettua 2,8 tonnia kartonkia vuosituotannon ollessa 169 619 tonnia. Uusien sähkökäyttöjen tuoma osuus 8 MW teholumemaan ei mahdollisesti tuo suurta lisäystä jatkuvan ajon aikana.

## 11 MOOTTORIVAIHTOEHTOJEN VERTAILU

Käyttöjen moottoreilta vaaditaan tiettyjä kartonkikoneen määäämiä perusominaisuuksia. Työssä tarkasteltiin kolmea erityyppistä moottoriratkaisua vaihtoehtoksi käyttöjen moottoreiksi. Kaikki esiteltyt moottorityypit soveltuvat kartonkikoneen sähkökäyttöjen moottoreiksi, vaikka ovatkin tekniikaltaan erilaisia. Moottorit ovat rakenteeltaan sellaisia, että niitä voi käyttää moottorina ja tarvittaessa generaattorina jarrutustilanteissa.

*Tasavirtamoottori* on pitkään hallinnut konekantaa paperiteollisuudessa. Tasavirtamoottori on tekniikkansa puolesta moottoreista herkin haittatekijöille. Se vaatii säännöllistä huoltoa ja kunnossapitoa, josta syntyy lisäkustannuksia koneen elinkaaren aikana. Tasavirtamoottori tarvitsee toimiakseen tyristorisillalla ohjatun tasasähkösyötön ja erillisen magnetoinnin apulaitteineen tai taajuusmuuttajan oheislaitteineen. Konetyypin menestymisen aikanaan selittää sen hyvä ja tarkka säädettävyys.

*Oikosulkumoottorit* ovat yleisimmin käytettyjä sähkömoottoreita ja ovat yleistyneet teollisuudessa niiden ohjainlaitteiden kehityttyä. Nyt ne ovat syrjäyttäneet jo tasavirtamoottorit uudisasennuksissa kartonkikoneissa. Oikosulkumoottori on edullinen, ja sen voi asentaa melkein minne vain. Moottori ei tarvitse säännöllisiä huoltotoimenpiteitä. Moottoria ohjataan taajuusmuuttajalla, jolloin sen maksimivääntömomentti saadaan alhaisesta käyntinopeudesta lähtien. Kone on ulkomitoiltaan standardi kaikkien valmistajien kesken, joten samaan petiin on mahdollista asentaa eri valmistajien laitteita.

*Tahtikoneista kestopagnetoitu tahtikone* edustaa uusinta tekniikkaa vertailtavista moottoreista. Moottorissa ei ole erillistä magnetointia, kuten yleensä tahtikoneissa on, vaan magnetoinnista huolehtivat kestopagneetit. Magneettien kiinnitys- ja sijoittelutapoja on erilaisia. Moottorin etuna on sen suuri vääntömomentti nollakierroksilta alkaen ja todella hyvä hyötysuhde verrattuna saman kokoluokan muihin moottoreihin. Siksi vaihteistoja ei välttämättä tarvita edes suuri-kuormaisissa käytöissä. Moottori pyörii täsmälleen syöttävän verkon taajuuden määäämää nopeutta ja moottoria ohjataan nykyaikaisilla taajuusmuuttajilla.

Saneerattaviin käyttöihin ei ole enää järkevä asentaa tasavirtamoottoreita, vaan mieluummin taajuusmuuttajaohjattuja, joko edullisempia oikosulkukoneita tai uuden tekniikan kestopagnetoituja tahtikoneita. Tahtikone on huomattavasti kalliimpi johtuen sen kalliista magnetointitekniikasta. Moottorin pyöriessä suurimman osan vuodesta tulee tahtikone sen elinkaaren aikana edullisemmaksi verrattuna vastaavan tehoiseen oikosulkukoneeseen hieman huonommalla hyötysuhteella. Jos moottoria käytetään vain harvakseltaan, ei hyötysuhteen vaikutus näy juurikaan kustannussäästöissä. Silloin ehdoton valinta on oikosulkukone.

Tekstissä esiintyneen laskelman perusteella moottorin hankintakustannukset ovat marginaaliset, vain prosentin luokkaa kokonaiskustannuksista sen 30 vuoden elinkaaren aikana. Tämän johdosta kannattaa panostaa hankintavaiheessa korkean hyötysuhteen sähkökäyttötekniikkaan mahdollisuuksien mukaan etenkin, kun kartonkikoneen käyttöillä moottorit pyörivät vuodessa suuria tuntimääriä.

## **12 KÄYTTÖJEN VALINTA**

Vertailun kolmesta eri käyttövaihtoehdoista nostetaan esille kaksi hyvää vaihtoehtoa yhtiön kartonkikoneen 1 saneeraustarpeisiin sopiviksi vaihtoehdoiksi. Valinnoissa huomioidaan nykyajan suuntaus käyttöjen tekniikassa, moottoreiden ja niiden ohjainlaitteiden käytettävyydessä, standardilaitteiden varaosien saatavuudessa ja erityisesti energiatehokkuudessa.

### **12.1 Sähkökäyttövalinnat**

Tekstissä esiteltyjen sähkökäyttövaihtoehtojen ja niiden perusteluiden pohjalta ehdotetaan moottoreiksi oikosulkumoottoreita ja kestopagnetoituja tahtimoottoreita ja käytöiksi linjakäyttöä. Linjakäytössä moottoreita ohjaavat sen välipiiriin kytketyt taajuusmuuttajat. Välipiiriin tasajännite saadaan tasasuuntausosasta tyristori- tai diodisillasta riippuen siitä, kulkeeko teho sähköverkosta moottoreille vai sekä moottoreille että takaisin verkkoon käyttötilanteiden mukaan. Tilanteeseen vaikuttaa myös se, miten ja minne moottoreiden generoima energia siirretään välipiiristä. Vaihtoehtona ovat toiset moottorit, jarruvastus tai verkkoon jarrutus.

Valta-akselin poistuttua tilalle on hyvä asentaa ehdotettu linjakäyttöratkaisu. Sähkötilaan asennettaisiin yksi tai useampi välipiirin syöttöyksikkö ja välipiiriin tarvittava määrä taajuusmuuttajia ohjaamaan käytöille asennettavia moottoreita. Jokaisella moottorilla olisi tällöin oma taajuusmuuttaja (invertteri) ja yhteinen tasasuuntausosa. Jokaista taajuusmuuttajaa voidaan näin ollen ohjata erikseen muista riippumatta.

Käytöille hyviä vaihderatkaisuja moottoreiden perään ovat korkean hyötysuhteen planeettavaihteet ja hyvän hyötysuhteen hammasvaihteet. Molemmat sopivat kartonkikoneen käytöille hyvin. Valittaessa käytöille kestomagnetoidut tahtimoottorit oikosulkumoottoreiden sijaan ei vaihteita välttämättä tarvita.

Tässä työssä ei mitoiteta vaihteita käytöille, vaan ehdotetaan tiettyjä sopivia vaihderatkaisuja. Mitoittaminen tulee suorittaa vasta sitten, kun tiedetään käytöille asennettava moottorityyppi.

## **12.2 Valinnan perusteet**

Oikosulkumoottoritekniikka on edistynyt paljon vuosien saatossa ja niiden hyötysuhteita on saatu nostettua. Moottoreita ohjataan taajuusmuuttajilla, jotka nykyään kykenevät hyvällä tarkkuudella hankaliin ajoteknillisiin suorituksiin. Moottoreiden edullinen hankintahinta, hyvät ominaisuudet, ajettavuus taajuusmuuttajilla ja moottoreiden huoltovapaa tekniikka ovat nostaneet niiden kantaa paperiteollisuudessa. Oikosulkumoottorit ovat syrjäyttäneet käytössä olevat tasavirtamoottorit selkeästi. Oikosulkumoottorit ovat huolettomia laitteita käyttää.

Kestomagnetoidut tahtimoottorit ovat uusinta tekniikkaa, ominaisuuksiltaan ja hyötysuhteiltaan erinomaisia. Niillä on vielä verraten korkea hankintahinta rajoittamassa valintaa käyttöjen moottoreiksi, mutta kestomagneettien hintojen alennuttua tilanne voi kääntyä tahtimoottorien hyväksi. Pitkällä tähtäimellä kestomagnetoidun tahtimoottorin käyttökustannukset ovat selvästi edullisemmat kuin vastaavan oikosulkumoottorin. Energianäkökulmasta katsottuna kestomagnetoidu tahtimoottori on loistava valinta kartonkikoneen käytölle.

### 13 NOPEUDEN NOSTOON LIITTYVÄT YLEISET TEKIJÄT

Kartonkikoneen 1 tilauskanta on kääntynyt kasvuun suhdanteen nousun myötä, ja tällä hetkellä tilauskanta on enemmän kuin mitä kone pystyy tuottamaan. Kysyntää on paljon etenkin kuppikartongille.

Valta-akselin ja muun koneen käyttöjen uusinnan myötä yksi koneen nopeutta rajoittava tekijä poistuu, jolloin tältä osin voidaan koneen nopeutta nostaa viiraosan mitoitettuun 600 m/min. Samalla poistuvat käytössä olevat ryömintäkäytöt.

Ulkopuolinen yritys on tekemässä kattavaa kartoitusta koko kartonkikoneen päivittämiseksi viiraosan mitoitettuun nopeuteen 600 m/min. Suunnitelman on tarkoitus valmistua alkukesästä 2011. Suunnitelma on perusteellinen, ja yhtiö sen hyväksyttyään tekee mahdollisesti investointeja lähitulevaisuudessa. Kohtuullisen uutta laitekantaa on saatavilla Stora Enson Saksan tehtailta purettavalta koneelta. Tämä laitekanta on tarkoitus hyödyntää kartonkikoneen 1 modernisoinnissa Imatralla. Investointisuunnitelmat ottavat tämän seikan huomioon.

Päivityksen yhteydessä on suunnitelmissa asentaa viiraosalle kolmas peräläättikko, jolloin päästään tuottamaan nelikerroskartonkia. Tämä puolestaan tuottaa ongelmia massojen valmistukseen ja niiden jakeluun sekä lisää massareseptien määrää entisestään. Nelikerroskartonki mahdollistaa paremman kuppikartongin valmistuksen, mutta tuo mukanaan ajoteknillisiä ja laadullisia vaikeuksia mm. rainojen yhteen liittämisessä ja bulkin määrässä.

Viiraosa ja 3. kuivausryhmä ovat tekniseltä mitoitukseltaan sopivia 600 m/min:ssa nopeudella ajoin, mutta koneen muut osiot vaativat päivitystä. Puristinosalle on asennettava päivitetyt käytöt sekä tarvittavat muut mekaaniset komponentit, jotta ajonopeus on nostettavissa. Kuivausryhmät 1, 2, 4 ja 5 on mitoitettu ja tasapainotettu 450 m/min nopeuteen. Nopeuden noston myötä kuivausryhmillä viiran kireyttä täytyy lisätä, mutta tällöin on päivitettävä kaikki telat ja sylinterit vastaamaan uutta viiran kireysarvoa. On vaikea arvioida, että onnistuuko nopeuden nosto kuivaussylintereille pelkillä sähkökäyttöjen muutoksilla ilman komplikaatioita, vai vaativatko sylinterit jonkinlaisen tasapainotuksen taikka muun tarvittavan toimenpiteen. Ryhmille täytyy teettää koeajoja asian selvit-

tämiseksi ja sen myötä tarvittavia toimenpiteitä. Kaikkiaan kartonkikoneessa on kuivaussylintereitä 83 kpl.

Kartonkikoneen jälkeen seuraavana tuotantoa on ahdistamassa vanha 1200 m/min ajava pituusleikkuri. Yhtiön puolella on ollut puhetta pituusleikkurin päivityksestä. Harkinnassa on myös mahdollisuus uudesta pope-rullaimesta, jolla voitaisiin ajaa suurempia rullia halkaisijaltaan kuin nyt. Muutoksella saadaan enemmän pelivaraa pituusleikkurille ja tampurin vaihtoja tulee näin ollen vähemmän. Ei ole kuitenkaan varmaa, onko tällaisesta muutoksesta suurta hyötyä. Nykyinen konerullan maksimihalkaisija on luokkaa 3,3 m. Halkaisijan nostaminen esimerkiksi yli 3,5 m:iin tuo leikkurille vähän lisääaikaa. Tällöin nousee myös konerullan paino, joka vaikuttaa konerullan nosto- ja käsittelykalustoon.

Nopeamman kartonkikoneen myötä pituusleikkurilla tapahtuvat toiminnan keskeytymiset pakottavat nykyistä nopeammin koneen tuotannon rajoituksiin. (Pöhlänen 2011)

Muutosten myötä myös sähkönkulutus lisääntyy ja todennäköisesti nykyään käytössä olevan muuntajan T73 tehoresurssit eivät tule riittämään käyttöjen päivityksen ja uusintojen jälkeen. Uusi muuntaja on suuri kustannuserä.

## **14 PÄÄTELMÄT**

Työn tarkoituksena oli perehtyä valta-akselikäytön uudistamiseen teknisesti ja tuoda esille varteenotettavia sähkökäyttöratkaisuja vanhan käytön päivittämiseksi. Lisäksi työssä oli tarvetta perehtyä kartongin valmistukseen ja sen tuomiin vaatimuksiin kartonkikoneen sähkökäyttöille. Suunnitelluissa vaihtoehtoisissa ja mitoituksissa tuli ottaa huomioon koneen nopeuden nosto 600 m/min, jolloin myös koneen muiden sähkökäyttöjen osuus laitekannan päivityksessä oli tarpeellinen kartoittaa.

Työssä käytiin läpi kartongin valmistusprosessia sekä mietittiin, millaisia vaatimuksia kartonkikone asettaa käyttöille erilaisissa käyttökohteissa viiraosalta rullaimelle. Koneen käyttöjen tekniikkaa esiteltiin mekaanisten ja sähkötekniisten ratkaisujen pohjalta. Perehdyttiin olemassa oleviin sähkökäyttöihin ja tutkittiin

erilaisten vaihtoehtojen mahdollisuuksia koneen käyttöratkaisuiksi. Sähkökäytön häiriöihin otettiin yleisesti kantaa ja häiriöiden mahdollisia vaikutuksia moottoreihin ja sähköverkkoon pohdittiin. Moottoreiden energiatalous nostettiin esille kallistuvan sähköenergian takia ja pohdittiin moottoreiden hyötysuhteen vaikutusta sähkönkulutukseen. Kantaa otettiin myös yleisesti sähkömoottoreiden energiatehokkuuteen.

Sähkömoottorikäyttöistä vertailussa oli kolme erityyppistä ratkaisua, joista jokainen sovellus oli varteenotettava vaihtoehto. Vertailtavana oli tasavirtamoottori, oikosulkumoottori ja kestopagnetoitu tahtimoottori. Moottoreista voidaan suositella kartonkikoneen sähkökäyttöille energiatehokkaita oikosulkumoottoreita ja kestopagnetoituja tahtimoottoreita linjakäyttöperiaatteella. Linjakäyttö mahdollistaa sähköisen jarrutuksen, kustannustehokkaan ja tilaa säästävän ratkaisun. Sähköisellä jarrutuksella toteutettu käyttö mahdollistaa sen, että mekaanisia jarruja ei tarvita. Ehdotetut ratkaisut johdattelevat järkevää ja energiataloudellista linjausta nykypäivän teollisuudessa.

## KUVAT

Kuva 2 KA1 kuivapää, s. 12

Kuva 3 Vuonna 1950 Beloitin valmistama kartonkikone 1, s. 14

Kuva 4.1 KA1 viiraosa ja perälaatikot, s. 20

Kuva 4.2 KA1 puristinosa, s. 20

Kuva 4.3 KA1 kuivatusosa, s. 21

Kuva 4.4 KA1 liimauspuristin, s. 22

Kuva 4.5 KA1 kalanterit ja rullain, s. 24

Kuva 5.1 Marshallin järjestelmän käytön konetasolla sijaitseva osa, s. 30

Kuva 5.2 Marshallin järjestelmän käytön konetason alapuolella sijaitseva osuus, s. 31

Kuva 5.3 Kuivausryhmän ryömintäkäytön oikosulkumoottori ja vaihde, s. 32

Kuva 5.4 1. kalanterin alatelan moottori vaihde, s. 34

Kuva 5.5 Kartiohihnapyörästäön rakennekuva, s. 35

Kuva 5.6 Differentiaalivaihteen kaaviokuva ja PIV- variaattori, s. 36

Kuva 5.7 Planeettavaihteiston rakennekuva ja vaihteen käyttösovellus kartonkikoneen kuivatusosalle asennettuna, s. 36

Kuva 5.8 Periaatteellinen toteutus paineilmatoimisesta kytkimestä, s. 38

Kuva 5.9 Kitkakytkimessä tapahtuva hyöty- ja hukkatyö, s. 38

Kuva 5.10 Valta-akselin käyttömoottori ja akseli konetason alapuolella, s. 40

Kuva 6.1 Sähkömoottorin yleinen toimintaperiaate, s. 45

Kuva 6.2 Sähkökäytön periaatekuva, s. 46

Kuva 6.3 Sähkökäyttö useilla erillisillä vaihtosuuntausyksiköillä, linjakäyttö, s. 47

Kuva 6.4 KA1 rullaajan rummun käyttömoottori, s. 49

Kuva 6.5 Nelinapaisen tasavirtakoneen leikkauskuva, s. 50

Kuva 6.6 Tyristorihjattu kolmivaiheinen siltakytkentä, s. 51

Kuva 6.7 Kolmivaiheisen oikosulkumoottorin räjäytyskuva, s. 52

Kuva 6.8 Taajuusohjatun oikosulkumoottorin suhteellinen vääntömomentti erilaisilla syöttöjännitteen taajuuksilla, s. 57

Kuva 6.9 Epätahtimoottorin ominaiskäyräohjaus, suhde  $U/f$ , s. 58

Kuva 6.10 Taajuusmuuttajan syöttämä oikosulkumoottorin momentti- ja kierroskäyrät, s. 59

Kuva 6.11 Staattorille syötetty pulssimainen kolmivaiheinen jännite ja sen aikaansaama vääntömomentti, s. 61

Kuva 6.12 Staattorille syötetty sinimuotoinen kolmivaiheinen jännite ja sen aikaansaama vääntömomentti, s. 62



Kuva 6.13 Suorakäyttö ja Metson ABB:n kanssa kehittänyt DrivePro- koneintegroitu käyttölaitteisto, s. 63

Kuva 6.14 DrivePro- koneintegroitu käyttö soveltuu kokonsa ansiosta hyvin koneuusintoihin, s. 64

Kuva 6.15 Kolmivaiheinen 6- pulssisuuntaaja toteutettuna PWM- tekniikalla, s. 65

Kuva 6.16 Skalaarisäätö, PWM, s. 67

Kuva 6.17 Vektorisäätö, PWM, s. 68

Kuva 6.18 Suora momentinsäätö, DTC, s. 69

Kuva 6.19 Linjakäytön rakenne, multidrive, s. 71

Kuva 10.1 Sähkömoottorin häviöiden määrittely, s. 82

Kuva 10.2 IE- hyötysuhdeluokat 4-napaisille 50 Hz moottorille, s. 84

Kuva 10.3 Moottoreiden hyötysuhteiden vaikutus kustannuksiin, s. 86

## **TAULUKOT**

Taulukko 6.1 Oikosulkumoottorien yleisimmät vakionopeudet ja napapariemäärät, kun  $f$  on 50 Hz, s. 54

Taulukko 6.2 Tahtimoottorin synkroniset pyörimisnopeudet eri napapariluvulla, kun  $f$  on 50 Hz, s. 62

Taulukko 10.1 Moottoreiden tekniset tiedot ja vuosikulutukset, s. 85

Taulukko 10.2 Moottoreiden hukkaenergioiden suuruudet, s. 85

Taulukko 10.3 Mahdollisia moottorijärjestelmän energiatehokkuuden parantamistoimenpiteitä, s. 88

## LÄHTEET

ABB ACS800. Hardware Manual. ACS800-01 Drives (1.1 to 110 kW). ABB Oy:n esite.

ABB asiakaslehti 3/2009. Sähkömoottorin hyötysuhteella on väliä. Saatavilla www-muodossa: <http://abb.smartpage.fi/fi/power309/> (Luettu 21.3.2011)

ABB Group. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita. Kymmenes painos. Vaasa: Ykkös-Offset Oy.

ABB industrial drivers. ACS800, single drives 0.55-5600 kW Catalog. ABB Oy:n esite.

ABB Oy:n internetsivut. <http://www.abb.fi/ProductGuide/> (Luettu 29.3.2011)

Arjas, A. 1983. Paperin valmistus III osa 2. Toinen painos. Oy Turun Sanomat / Serioffset

Aura, L & Tonteri, A. J. 1996a. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. Porvoo: WSOY:n graafiset laitokset.

Aura, L & Tonteri, A. J. 1996b. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. Porvoo: WSOY:n graafiset laitokset.

Aura, L & Tonteri, A. J. 1986c. Sähkämiehen käsikirja 3. Tehoelektroniikka ja sähkökoneiden käyttö. Porvoo: WSOY:n graafiset laitokset

Direct Industry Oy:n internetsivut. <http://www.directindustry.com/prod/leroy-somer/permanent-magnet-synchronous-electric-motors-pmsm-8355-54081.html> (Luettu 29.3.2011)

Eforanet. Stora Enson sisäiset Efora Oy:n intranetsivut. <http://worksite.storaenso.com/eforanet/Sivut/Etusivu.aspx> (Luettu 29.3.2011)

Federley, J. 2009. Energiatohokkaat moottorikäytöt. Motiva Oy. Saatavilla www-muodossa: [http://www.motiva.fi/files/2408/Energiatohokas\\_moottorij\\_rjestelm\\_.pdf](http://www.motiva.fi/files/2408/Energiatohokas_moottorij_rjestelm_.pdf) (Luettu 16.2.2011)

Hedman, A. 2009. Taajuusmuuttajat. ABB Oy. Saatavilla www-muodossa: <http://www.pkky.fi/Resource.phx/pkky/projektit/taitaja-osaaminen/sahko.htx.i2025.pdf> (Luettu 10.2.2011)

Häkkinen, P. 2008. Laivan sähköverkko. Luku 5.2. Saatavilla www-muodossa: [http://www.tkk.fi/Yksikot/Laiva/Opinnot/Kurssit/Kul-24.4410/pdf/luku\\_5.2.pdf](http://www.tkk.fi/Yksikot/Laiva/Opinnot/Kurssit/Kul-24.4410/pdf/luku_5.2.pdf) (Luettu 15.3.2011)

Hämäläinen, P. 2008. Loistehon tuottaminen painehiomon tahtimoottoreilla. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan osasto. Kandidaattityö.

Imatramills. Stora Enson Imatran tehtaiden sisäiset intranetsivut.  
<http://imatramills/navi.asp?m=2&s=7> (Luettu 14.2.2011)

Jefa rudder and steering website. Jefa Steering System.  
<http://www.jefa.com/steering/products/drives/direct-dd1.htm> (Luettu 15.3.2011)

Karlsson, M. 2000. Papermaking Part 2, Drying. Book 9. Jyväskylä: Gummerus Printing Oy

KnowPap 7.0. 2005. Paperitekniiikan ja automaation oppimisympäristö. VTT Tuotteet ja tuotanto. Prowledge Oy.

Korpinen, L. 2010. Sähkökoneet, osa 2. Saatavilla www-muodossa:  
[http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/10sahkokoneet\\_2osa.pdf](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_2osa.pdf)  
(Luettu 14.2.2011)

Kortelainen, A. 2010. Sähkömoottoreiden uudet hyötysuhdeluokitukset ja tulevat rajoitukset. ABB Oy. Saatavilla www-muodossa:  
[http://www.lut.fi/fi/pumpingday/program/Documents/03\\_Kortelainen\\_Antti.pdf](http://www.lut.fi/fi/pumpingday/program/Documents/03_Kortelainen_Antti.pdf)  
(Luettu 10.2.2011)

Kumera Oy:n internetsivut. <http://www.kumera.com> (Luettu 1.4.2011)

Lappeenranta University of Technology. Tutkimusmateriaali. Sähkömoottori. Saatavilla www-muodossa:  
[http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical\\_engineering/articles/electrical\\_motor/Sivut/Default.aspx](http://www.lut.fi/fi/technology/lutenergy/electrical_engineering/articles/electrical_motor/Sivut/Default.aspx) (Luettu 15.3.2011)

Leppä, A. 2003. Kestomagneettitahtikonekäytön soveltaminen paperiteollisuuden linjakäytössä. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan osasto. Diplomityö.

Neuvonen, K. 2001. Kartonkikoneen sähkökäyttöjen uusiminen. Etelä-Karjalan ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.

Pitkänen, M. 2010. Uusi DrivePro- koneintegroitu käyttö. Kestomagneettimoottorilla toteutetut käytöt vähentävät huoltokohteita ja säästävät energiaa. Results pulp & paper 2/2010.  
[http://www.metso.com/MP/Marketing/mpv2store.nsf/BYWID/WID-100525-2256E-9CAAD/\\$File/210ResultsSupplementFIN.pdf?openElement](http://www.metso.com/MP/Marketing/mpv2store.nsf/BYWID/WID-100525-2256E-9CAAD/$File/210ResultsSupplementFIN.pdf?openElement) (Luettu 21.3.2011)

Planeettavaihteet –rakenne, vikaantuminen ja havainnointimenetelmät. VVT tutkimusraportti 15.3.2005. Saatavilla www-muodossa:  
[http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/pdf/servoplaneettavaihteet\\_btuo43-051349.pdf](http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/pdf/servoplaneettavaihteet_btuo43-051349.pdf) (Luettu 15.3.2011)

Puranen, J. 2002. Sähkömekaanisen vaihteiston mitoitus ja suorituskky. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Sähkötekniikan osasto. Diplomityö.

Rouhiainen, J. 2010. Uuden taajuusmuuttajamerkin käytettävyyden arviointi. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Opinnäyte-työ.

Ruppa, E. & Lilja, T. 2003. Sähkötekniikkaa sivuaineopiskelijoille. Kolmas pai-nos. Pori: Tammertekniikka.

Stora Enson SAP-tietojärjestelmä. Kartonkikone 1 telakaavio. (Luettu 1.4.2011)

Sepsilva Ltd Oy. 1997. Puusta paperiin M-506 Kartonkikoneet. Toinen painos. Valmet.

Sähkömoottoreiden EFF-hyötysuhdeluokat historiaan. SLO Oy:n julkaisu 1.7.2010. Saatavilla [www.muodossa:](http://www.muodossa:)  
<http://www.slo.fi/www/fi/Ajankohtaista/tuoteuutisarkisto/Sivut/Sahkomoottoreide>  
[nEFF-hyotysuhdeluokathistoriaan.aspx](http://www.slo.fi/www/fi/Ajankohtaista/tuoteuutisarkisto/Sivut/Sahkomoottoreide) (Luettu 21.3.2011)

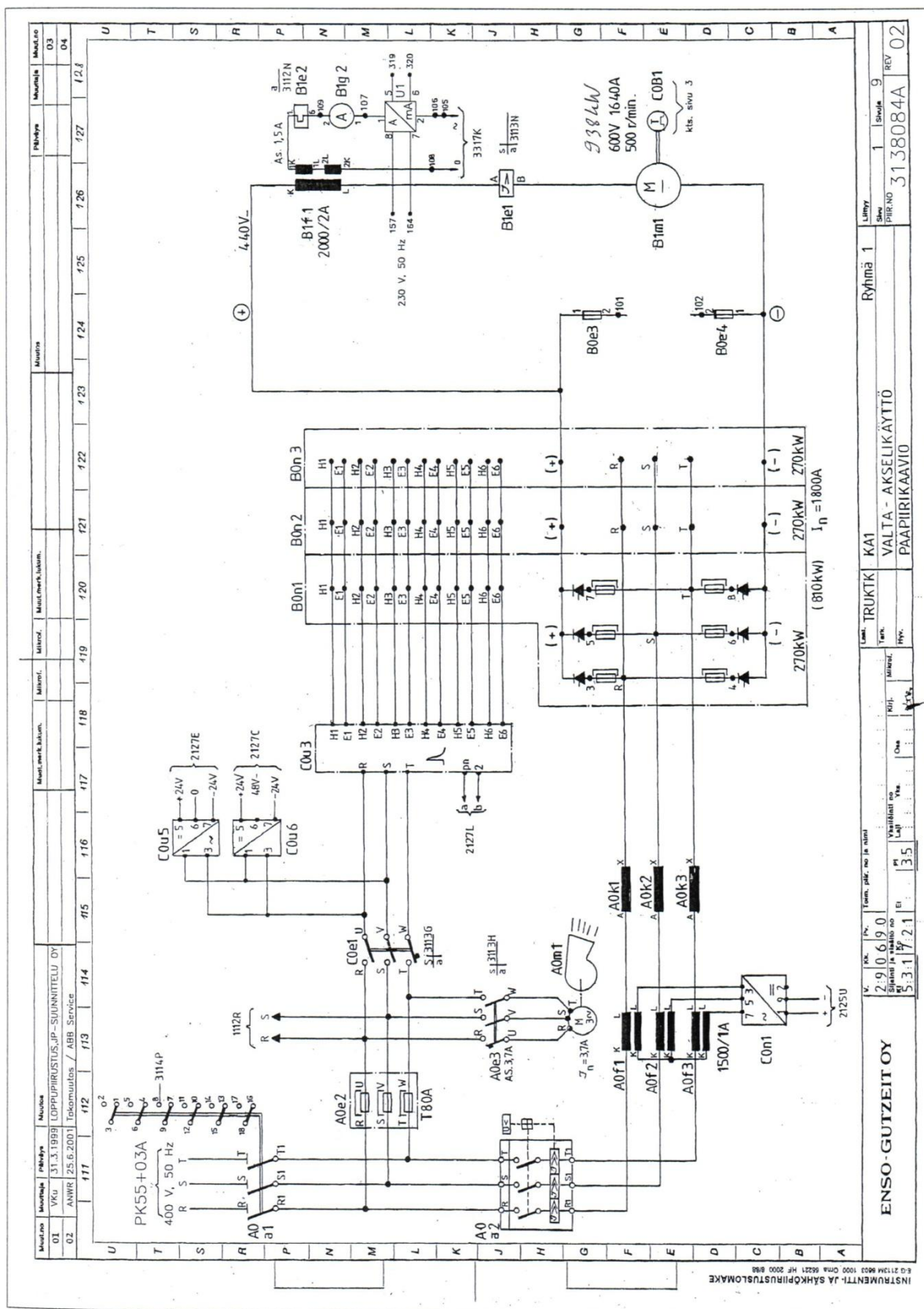
Tekninen opas nro 1. Suora momentinsäätö. ABB Oy:n esite.

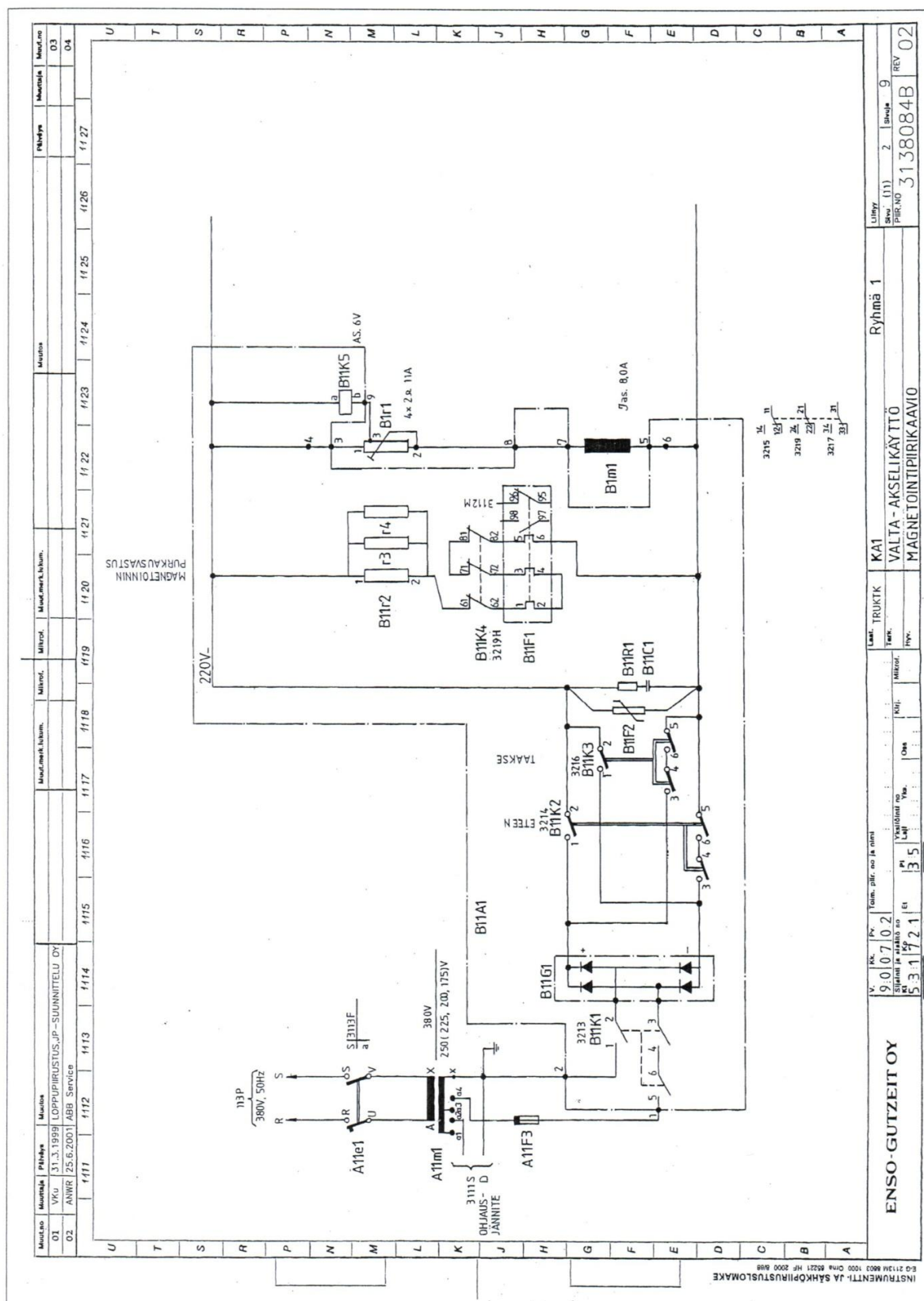
Tekninen opas nro 7. Sähkökäytön mitoitus. ABB Oy:n esite.

Tiainen, T. 2001. Sähkökäyttöryhmien suorituskvyn kartoitus paperitehtaassa. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan osasto. Diplomityö.

Wikibooks. Power.  
[http://en.wikibooks.org/wiki/Embedded\\_Control\\_Systems\\_Design/A\\_design\\_ex](http://en.wikibooks.org/wiki/Embedded_Control_Systems_Design/A_design_ex)  
[ample\\_2](http://en.wikibooks.org/wiki/Embedded_Control_Systems_Design/A_design_ex) (Luettu 1.4.2011)

Wikipedia. Kestomagneettitahtimoottori.  
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Kestomagneettitahtimoottori#Kestomagneettitahtimoot>  
[tori](http://fi.wikipedia.org/wiki/Kestomagneettitahtimoottori#Kestomagneettitahtimoot) (Luettu 15.3.2011)





## Koneen käyttöjen nykyiset ja mitoitettut RDC-moottoritehot

Taulukkoon on kerätty nykyisten moottoreiden hyötysuhteet siltä osin kun ne ovat olleet saatavilla. Vertailuun hyötysuhteiden ja moottoritehojen osalta ei saatu mukaan kestmagnetoituja tahtimoottoreita tietojen saatavuuden takia.

Käyttö	Nykyiset käytössä olevat koneet			Uudet epätahtikoneet		
	$\eta$ / %	konetehot / kW	AC / DC	$\eta$ / %	RDC-konetehot / kW	AC / DC
<b>Viiraosa</b>						
Alaviiran imutela	93,8	205	DC	94,9	220	AC
Alaviiran palautustela	92,5	100	DC	93,9	100	"
Alaviiran vetotela	94	440	DC	94,9	220	"
Yläviiran vetotela	93	210	DC	94,9	220	"
Yläviiran liitostela	92,5	100	DC	93,9	100	"
Formeri (varaus)				94,9	220	"
<b>Puristinosa</b>						
1. puristin ylätela	92,1	120	DC	93,9	120	"
1. puristin imutela	95	938*	DC	94,6	140	"
2. puristin ylätela	"	"	DC	94,6	140	"
2. puristin imutela	"	"	DC	94,6	140	"
3. puristin ylätela	"	"	DC	94,6	140	"
3. puristin imutela	"	"	DC	94,6	140	"
<b>Kuivatusosa</b>						
1. kuivausryhmä	"	"	DC	93,9	180	"
2. kuivausryhmä	"	"	DC	94,8	230	"
3. kuivausryhmä	"	"	DC	94,8	230	"
4. kuivausryhmä a	"	"	DC	93,9	180	"
4. kuivausryhmä b	"	"	DC	93,4	80	"
5. kuivausryhmä	"	"	DC	94,5	160	"
<b>Liimapuristin</b>						
Liimapuristimen ylätela	90,5	32	DC	91,9	60	"
Liimapuristimen alatela	90,5	32	DC	91,9	60	"
<b>Kalanterit</b>						
1. kalanteri ylätela		orjatela		94,9	120	"
1. kalanteri alatela	90,1	143	DC	94,9	120	"
2. kalanteri ylätela	90,1	143	DC	94,9	120	"
2. kalanteri alatela	90,1	143	DC	94,9	120	"
1. kalanterin johtotelat	83,1	7,5	AC	83,1	7,5	"
1. kalanterin levitystelat		2,2	AC		2,2	"
2. kalanterin johtotela	83,1	7,5	AC	83,1	7,5	"
2. kalanterin johtotelat	83,1	7,5	AC	83,1	7,5	"
Köysikäyttö		30	AC		30	"
<b>Rullain</b>						
Rullaaja	92,1	120	DC	94,9	120	"

\* Valta-akselin käyttömoottori

### Tasavirtamoottori



- + Säädettävyys
- + Tasainen vääntömomentti
- + Yksinkertainen ohjauselektronikka
- Hankintahinta vrt. kilpailijat
- Huollon tarve
- Huolloista kertyvät kustannukset
- Herkkä laite ympäristön kannalta
- Tarvitsee jäähdytyspuhalluksen

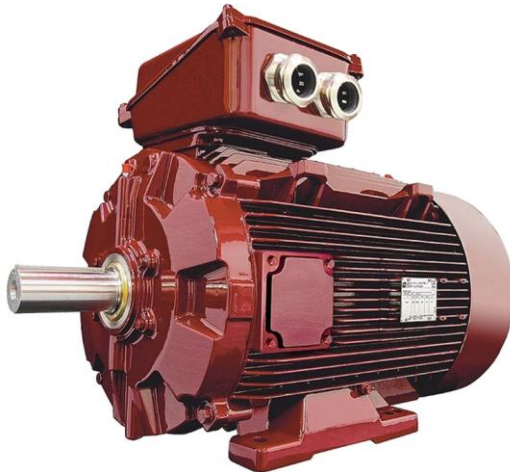
### Vaihtovirtamoottori



- + Edullinen hankintahinta
- + Edulliset huoltokustannukset
- + Kestävä, luotettava ja tehokas rakenne
- + Laaja käyttöalue
- + Mahdollisuus asentaa vaikeisiin olosuhteisiin
- + Nykyaikaisilla ohjaus- ja säätölaitteistoilla tarkka nopeuden ja momentin säätö
- + Parantunut hyötysuhde
- + Standardi rakenne
- Vaatii monimutkaisen ohjaus- ja säätöjärjestelmän, taajuusmuuttaja



### Kestomagnetoitu tahtimoottori



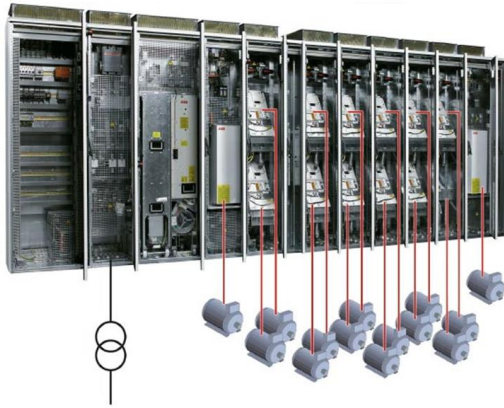
- + Suuri vääntömomentti jo pienillä kierroksilla
- + Ei tarvita vaihderatkaisuja
- + Hyvä hyötysuhde ja säätötarkkuus
- + Ilman vaihdetta vie vähän tilaa
- + Sääto ja ohjaus taajuusmuuttajalla
- + Ei vaadi jatkuvaa huoltoa
  
- Kallis moottori kestopagneettien osalta
- Vaatii monimutkaisen ohjaus- ja säätöjärjestelmän, taajuusmuuttaja
- Rajoittunut pyörintänopeus 3000rpm kestopagneettien takia

### Taajuusmuuttaja



- + Ajotekniset ominaisuudet
- + Monipuoliset säädöt
- + Helppo käyttöönotto ja käytettävyys
- + Energian säästö vrt. vanhat ratkaisut
  
- Sääto tekniikka aiheuttaa haitallisia yliaaltoja, tarvitsee häiriösuodatuksen
- Monimutkainen moottorinohjainlaite

## Linjakäyttö



+ Mahdollisuus ohjata yhtä tai useampaa konetta

+ Energian säästö

+ Tilan säästö ja pienemmät asennuskustannukset

+ Vikasietoisuus

+ Monipuoliset ominaisuudet ja valinnan mahdollisuudet laitteissa

– Nestejäähdytyksen kallis investointikustannus

– Puhallinjäähdytyksen melutaso ja sähkötilaan aiheutuva vedontunne

(ABB Oy 2011; Drirect Industry Oy 2011.)

**Moottorityyppien keskinäinen vertailu**

Vertailussa oletetaan, että moottorit ovat tasavertaisilla ominaisuuksilla varustettua laitteita, jotta vertailu on järkevä suorittaa.

	<b>Tasavirta- moottori</b>	<b>Vaihtovirta- moottori</b>	<b>Kestomagnetoi- tu tahtimoottori</b>
<b>Hankintahinta</b>	kallis	edullinen	kallis
<b>Hyötysuhde</b>	kohtalainen	hyvä	erittäin hyvä
<b>Huoltokustannuk- set</b>	kohtuulliset	hyvin pienet	hyvin pienet
<b>Rajoitteita mootto- rin käyttöpaikalle</b>	kyllä on	ei ole	ei ole
<b>Ohjainlaitteisto</b>	DC-silta tai taa- juusmuuttaja	taajuusmuuttaja	taajuusmuuttaja
<b>Ajettavuus ja sää- dettävyyys</b>	hyvä	hyvä	hyvä
<b>Vaihteen tarve kartonkikoneen moottorikäytössä</b>	tarvitsee vaihteen	tarvitsee vaihteen	pääsääntöisesti vaihdetta ei tar- vita (pl. erittäin raskaat käytöt)
<b>Sopivuus karton- kikoneen käyttö- laitteeksi</b>	sopii	sopii hyvin	sopii hyvin
<b>Yleinen suuntaus</b>	Ennen kiistatta yli- voimaisin moottori paperiteollisuudes- sa, mutta nykyään muut moottorivaih- toehdot ovat men- neet ominaisuuks- sissa edelle	Yleisesti käytetty tasavirtamoottorin tilalla paperiteolli- suudessa ja on nykypäivän yleisin moottorityyppi	Nykyään vielä kallis kestopag- neettien osalta, mutta muuten erittäin hyvä vaihtoehto ver- tailun muille moottoreille

## KARTONKIKONEEN KUIVAUSRYHMIEN TEHONTARPEEN MUODOSTUMINEN

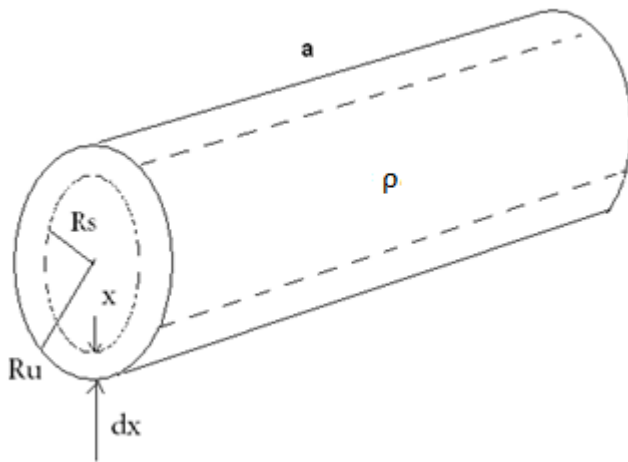
### Momentintarve moottorille normaaleissa olosuhteissa

Tarkastellaan esimerkkinä kartonkikoneen kuivausryhmän 3 hitausmomenttia ja määritetään sen myötä ryhmän momentintarve kuivaussylintereiden ja huopatelojen massan ja kiihdytysajan mukaan. Ryhmän huopatelojen (pienet ohjaustelat) osuus on määritetty osin arvioiden. Muiden tekijöiden kuten välitysten, akseleiden, laakereiden, ja viirojen tuomat osuudet jätetään laskelmista pois tarvittavien tietojen saatavuuden takia.

Saatavilla olevat lähtötiedot:

– maksimi ratanopeus	600 m/min
– kiihdytysaika 0...600 m/min	120 s
– kuivaussylinterin massa	7800 kg
– sylintereiden lukumäärä	20 kpl
– sylinterin ulko- / sisähalkaisija	1524 mm / 1390,65 mm
– huopatelojen lukumäärä	41 kpl
– huopatelojen keskim. massa	435 kg
– huopatelojen keskim. halkaisija	303 mm
– huopatelojen keskim. seinämän paksuus	10 mm

Kuivaussylinteri on karkeasti seuraavan kuvan 1 mukainen.



Kuva 1 Havainnollinen kuva sylinteristä

Kuvassa 1 e on sylinterin (raudan) tiheys,  $R_s$  sisäsäde,  $R_u$  ulkosäde,  $a$  pituus ja  $dx$  tiheysjakauma. Sylinterin muotoisen kappaleen hitausmomentti  $J$  määritetään integroimalla kaikki massat kolmiulotteisen avaruuden läpi.

$$J = \int x^2 dm, \quad \text{jossa } dm = \rho a 2\pi * dx$$

$$J = \int_{R_s}^{R_u} x^2 * dx(x) = \int_{R_s}^{R_u} x^2 \rho a 2\pi x * dx = \rho a 2\pi \int_{R_s}^{R_u} x^3 * dx = \rho a 2\pi \int_{R_u}^{R_s} \frac{1}{4} x^4 =$$

$$\rho a 2\pi \frac{1}{4} (R_u^4 - R_s^4) = \frac{1}{2} \rho a \pi (R_u^2 - R_s^2)(R_u^2 + R_s^2) \quad (1)$$

Lähtötiedoissa käytettävissä on massa  $M$ , joka voidaan sijoittaa hitausmomentin yhtälöön. Lieriömäisen kappaleen massa voidaan esittää seuraavasti:

$$M = \rho V = \rho a \pi (R_u^2 - R_s^2), \quad (2)$$

jossa  $v$  on kappaleen tilavuus. Sijoittamalla massan kaava 2 hitausmomentin yhtälöön 1 saadaan hitausmomentti esitettyä massan avulla seuraavasti:

$$J = \frac{1}{2} \rho a \pi (R_u^2 - R_s^2)(R_u^2 + R_s^2) = \frac{1}{2} M (R_u^2 + R_s^2) \quad (3)$$

Kuivausryhmän kiihdytyksen aikainen momentintarve  $M_{kiihd}$  muodostuu momentin dynaamisesta osasta  $M_{dyn,n}$  ja kuormituksesta  $M_k$ . Kiihdytyksen dynaaminen osa lasketaan seuraavasti:

$$M_{dyn,n} = J * \frac{2\pi}{60} * \frac{\Delta n}{\Delta t} \quad (4)$$

$$M_k = J * \frac{2\pi}{60} \quad (5)$$

$$M_{kiihd} = M_{dyn,n} + M_k \quad (6)$$

*Kuivaussylintereiden osuus:*

Kaavalla 3 laskettu yhden kuivaussylinterin hitausmomentiksi muodostui  $4150 \text{ kgm}^2$  ja 20 kuivaussylinterin hitausmomentiksi  $83000 \text{ kgm}^2$ . Kaavalla 4 lasketuksi dynaamiseksi momentiksi muodostui koko ryhmän sylintereille  $43460 \text{ Nm}$  ja kaavalla 5 kuorman osuudeksi  $8700 \text{ Nm}$ . Sylintereiden osalta momentin kokonaistarpeeksi  $M_{syl}$  kaavalla 6 muodostui  $52160 \text{ Nm}$ .

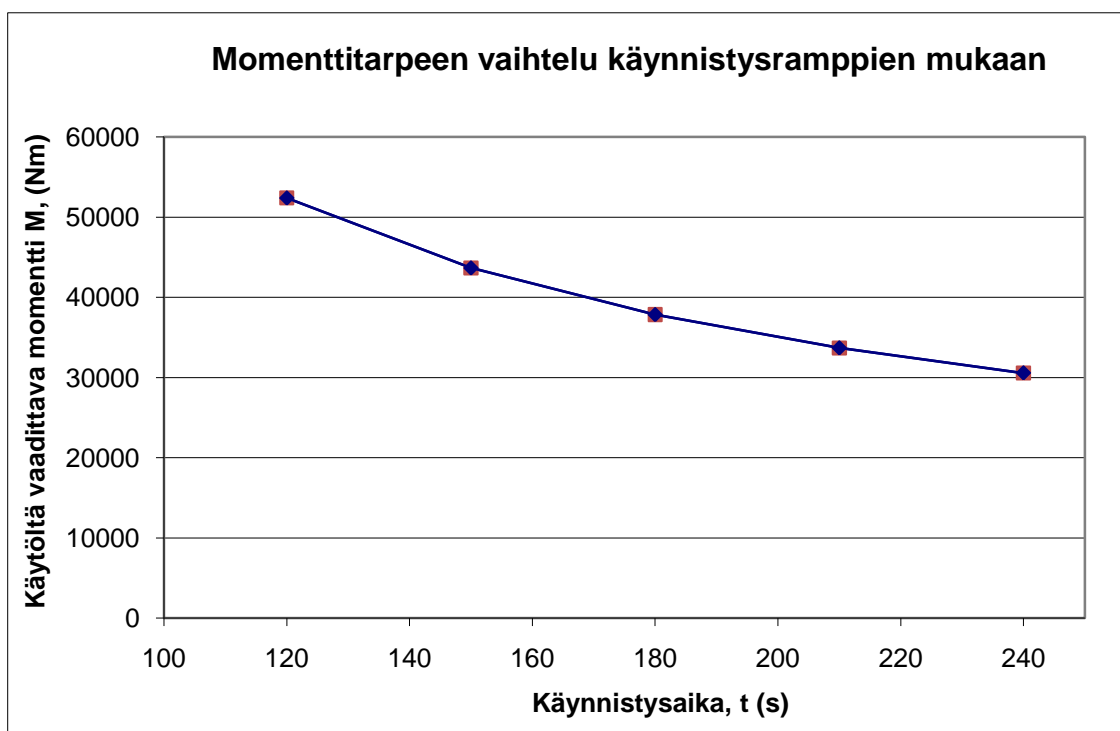
*Huopatelojen osuus:*

Huopatelojen osalta tiedot ovat osin arvioituja ja likimääräisiä, mutta arvoista voidaan laskea suuntaa antava momentintarve. Huopatelojen momentintarpeeksi  $M_h$  muodostui kuivaussylintereiden tavoin kaavoja 3, 4, 5 ja 6 noudattaen  $241 \text{ Nm}$ . Huopateloilla on todella pieni vaikutus momentintarpeeseen.

*Yhteenlaskettu osuus:*

Laskettaessa kuivaussylintereiden ja huopatelojen momentintarpeet yhteen, niin saadaan momentintarpeeksi  $M_{kiihd r}$  kaavalla 7 yhteensä  $52,4 \text{ kN}$ .

$$M_{kiihd r} = M_{syl} + M_h \quad (7)$$



Kuvaaja 1 Käytön momentintarve erilaisilla käynnistysrampeilla 2- 4 min

Kuvaajasta 1 nähdään käynnistysramppin suuruuden vaikutus momentintarpeeseen. Edellä lasketun esimerkin 2 min rampilla vaaditaan yli 52 kNm momentti ja kuvaajan 1 mukaan 4 min rampilla momentintarve jää reiluun 30 kNm. Näin ollen rampin suuruudella on huomattava vaikutus momenttitarpeeseen. Yleisesti kartonkikoneiden kiihdytysrampit ovat luokkaa 2- 4 min seisahtuneesta täyteen nopeuteen.

Moottorin akselille redusoitu kuormitusvääntömomentti muuttuu suoraan verrannollisena välityssuhteeseen, kuten moottoreiden mitoituksen teoriaosassa mainittiin. Kaavana asia voidaan esittää seuraavasti:

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{M'}{M}, \quad (8)$$

Kaavassa (8)  $n_1$  on moottorin nopeus,  $n_2$  käytön nopeus,  $M$  kuorman vääntömomentti ja  $M'$  moottorin akselille redusoitu vääntömomentti. Kaavassa käytetään nimellisiä arvoja. Nyt moottorille redusoiduksi momentiksi saadaan kaavan 8 mukaan johdettua:

$$M' = \frac{n_2 * M}{n_1} \quad (9)$$

Tällä tavoin voidaan määrittää laskemalla kuivausryhmän momentintarve sylintereiden ja huopatelojen osalta. On kuitenkin huomioitavaa, että mitoittamiseen vaikuttaa myös moni muu asia, kuin pelkästään sylinterit ja telat. Laskelmissa huomiotta jääneet tekijät tuovat oman lisänsä momentintarpeeseen. Lauhteen muodostumisella sylintereihin on todella suuri merkitys.

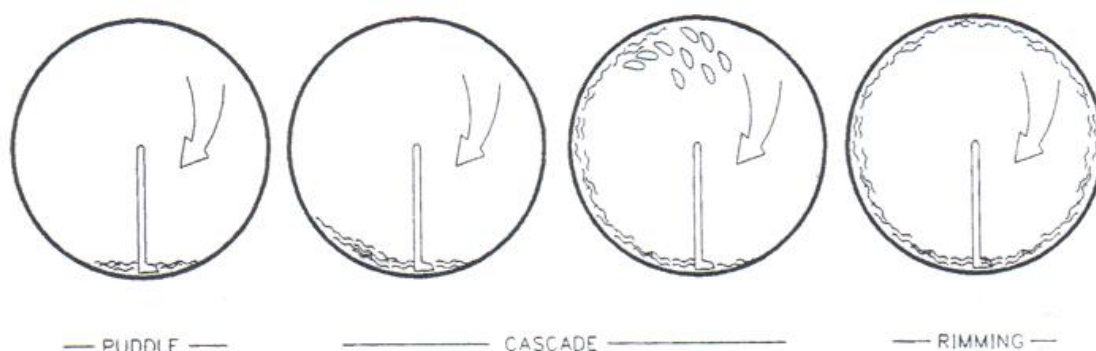
Kun momentit on määritetty, niin valitaan kierrosluvultaan sopiva moottori ja sen mukaan sopiva vaihde käytölle. Tämän jälkeen voidaan laskea kaavalla 9 ryhmän moottorille redusoitu momentinarvo ja varmistaa moottorin maksimimomentin riittävyys käynnistystilanteessa.

### **Lauhteen vaikutus sylinterin toimintaan**

Vaikka lauhdetta poistetaan tasaisesti sylintereistä, niin kuitenkin sitä kertyy sylintereihin vakaan toiminnan aikana. Lauhdetta ohjataan pois sylintereistä niihin asennetuilla sifoneilla (siphon). Nämä ovat joko paikallaan tai pyörivät sylinterin mukana. Suurin syy lauhteen kertymiseen sylintereihin on höyryn paine-eromuutokset tai sifonien vikaantuminen.



Lauhteen käyttäytymiseen sylintereiden sisällä vaikuttaa sylintereiden kierrosnopeus, sylinterin halkaisija, kondensioveden määrä ja sylinterin sisäpinnan laatu. Seuraavassa kuvassa on esitetty lauhteen käyttäytyminen sylinterissä kierrosnopeuden kasvaessa.



Kuva 2 Lauhteen liikkuminen sylinterin sisällä nopeuden vaihdella (Karlsson 2000)

*Puddle.* Alhaisissa nopeuksissa lauhde kertyy sylinterin pohjalle lätäköksi ja antaa sylinterille hyvän lämmönsiirtokertoimen. Tässä vaiheessa turbulenssi on olematon. Lätäköitymistä esiintyy alle 150 m/min ratanopeudella.

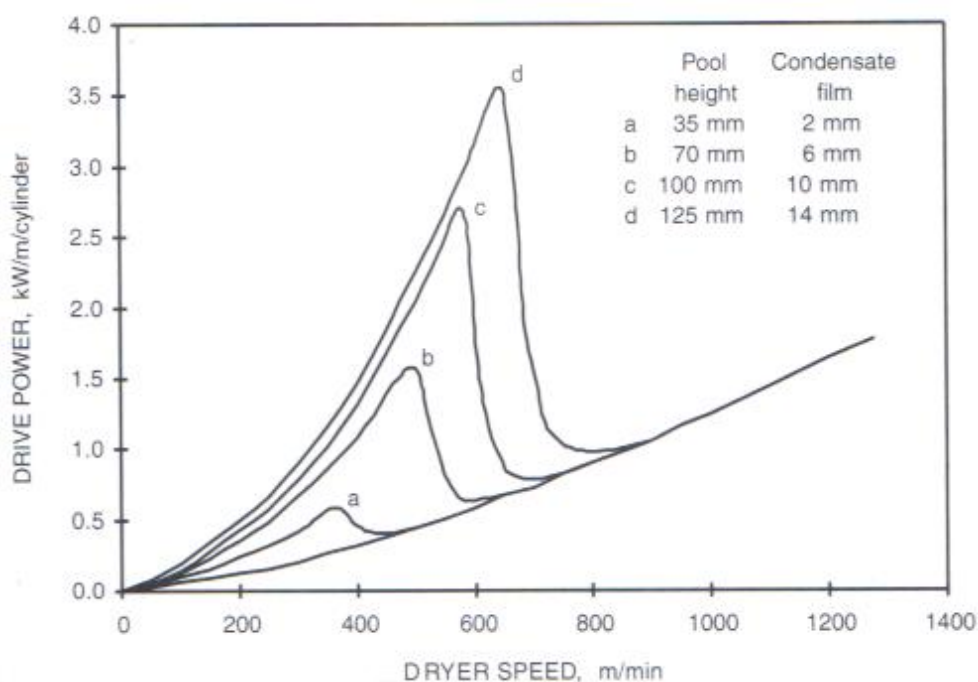
*Cascade.* Kun sylinterin nopeus kasvaa, niin kitkavoiman takia lätäköitynyt lauhde pyrkii nousemaan sylinterin seinämää ylöspäin, jolloin turbulenssi muuttuu suuremmaksi. Nopeuden kasvaessa entisestään lauhde kiipeää sylinterin seinältä sen yläosaan ja tippuu alas sylinterin pohjalle. Tämä vaihe muodostuu, kun nopeus on yli 150 m/min.

*Rimming.* Kun kuivausrummun nopeus kasvaa entisestään, muodostaa lauhde yhtenäisen kehän sylinterin sisäpinnalle. Siirtyminen tähän vaiheeseen muodostuu 300 – 425 m/min riippuen lauhteen määrästä. (Karlsson 2000.)

### Tehontarve kuivatuksessa lauhteen ollessa kuormittamassa

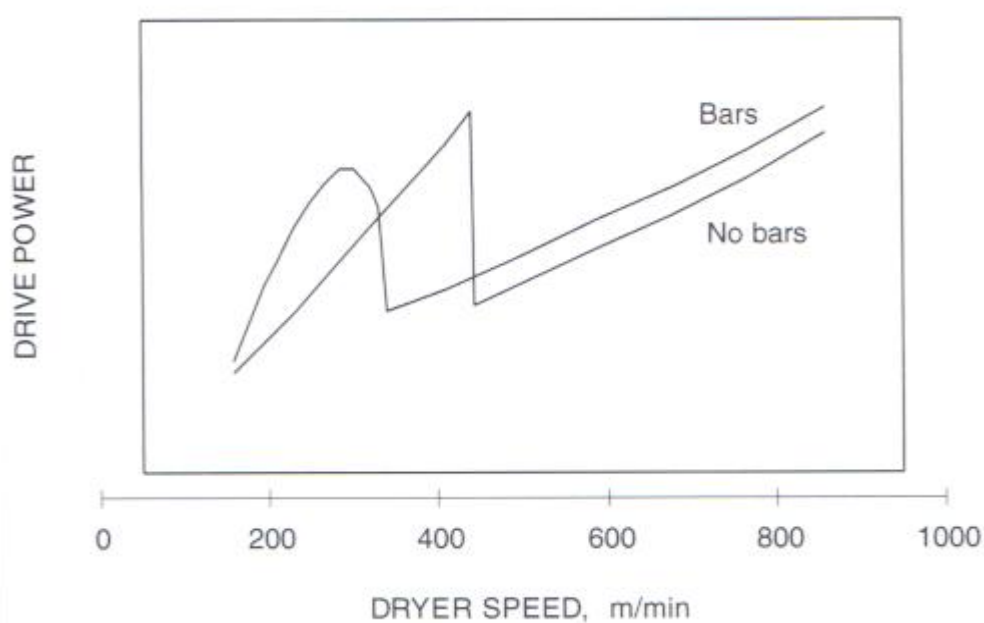
Kuivausryhmän tarvitsema tehontarve muodostuu huomattavassa määrin lauhteen määrästä ja sen käyttäytymisestä sylintereissä. Seuraava kuva havainnollistaa käytöltä vaadittavaa tehoa lauhteen määrän kasvaessa. Tehon tarve on pienimmillään, kun lauhde on lätäköitynyt sylinterin pohjalle.

Käyttötehon tarve kasvaa nopeasti *cascade*-alueella, jolloin lauhde nousee sylinterin seinämälle. Kun lahteen määrä kuivausrummussa on suuri, niin tarvitaan erittäin suurta tehoa. Siirryttäessä *cascade*-alueelta *rimming*-alueelle putoaa tehontarve äkillisesti. Tästä eteenpäin tehontarve kasvaa tasaisesti nopeutta nostettaessa. Nämä vaiheet ovat selvennetty seuraavassa, kuva 3.



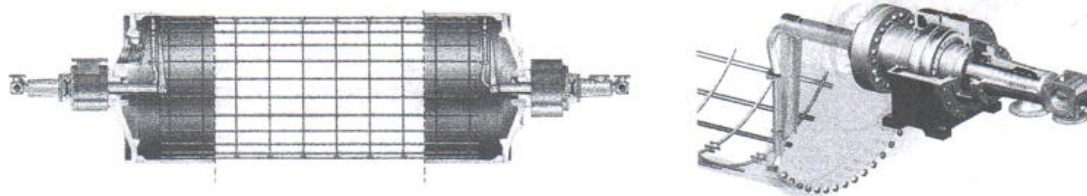
Kuva 3 Lauhteen vaikutus tehontarpeeseen erilaisilla lauhteen määrillä, kun kuivaussylinterin halkaisija on 1500 mm (Karlsson 2000)

Kuvasta 3 nähdään selkeästi kuinka suuri vaikutus lauhteen määrällä on tehontarpeeseen. Tehon tarve kasvaa huomattavasti, kun lauhde lähtee heilumaan sylinterissä ja huipputeho tarvitaan juuri ennen kun lauhde tasoittuu sylinterin kehälle. Lauhteen liikkumista voidaan osittain hillitä sylinterin sisälle asennettavilla poikittaisilla lämpörimoilla (spoiler bars), kuva 5.



Kuva 4 lämpörimojen (Spoiler bars) vaikutus tarvittavaan tehoon ja ajonopeuteen (Karlsson 2000)

Sylintereiden sisällä olevilla poikittaisilla ns. lämpörimoilla (spoiler bars) voidaan vaikuttaa lauhteen liikkumiseen sylinterin sisällä, jolloin saadaan hiukan erilaiset käyttöteho-nopeus- kuvaajat, kuvat 4 ja 5.



Kuva 5 Kuivaussylinterin rakennekuva, josta näkyy hyvin poikittaiset lämpörimat (spoiler bars) ja sifoni (siphon) oikeanpuoleisessa kuvassa L- kirjaimen muotoisena kappaleena ennen rimoitusta. (Karlsson 2000)

### **Moottorilta vaadittava momentintarve**

Lauhteen vaikutusta ei voida suoraan laskea sylinterinmuotoisen kappaleen mukaan, koska lauhde on nestemäistä ja liikkuu sylinterin sisällä. Käyttöryhmää kiihdytettäessä momentintarve muuttuu lauhteen käyttäytymisen mukaan, kuva 3. Sähkökäytön mitoituksen kannalta suurin tehontarve muodostuu *cascade*-alueella. Laitteiden toimittajilla on tietokoneohjelmat tehontarpeiden laskentaan ja moottoreiden mitoittamiseen. Liitteessä 2 on koko koneen RDC-tehontarpeet määritetty Metso Paperin mitoitusohjelmalla pohjautuen käyttöryhmien inertiaan.

Moottorin valintaan vaikuttaa kiihdytyksessä tarvittava momentintarve, johon vaikuttaa em. asiat kiihdytysaika ja kokonaishitausmomentti. Vaihteella voidaan muuttaa käytön nopeutta ja pienentää moottorilta vaadittavaa momenttia. (Karlsson 2000; SAP- tietojärjestelmä 2011.)

## Vaihteen valinta

Vaihteiden valmistajilla on erilaisiin käyttökohteisiin tarjolla monenlaisia vaihteistovaihtoehtoja asiakkaan valittavaksi. Jokaisella vaihdetyypillä on omat vahvuutensa. Tavallisimpia käytössä olevia ratkaisuja on mm.

- *Kierukkavaihde* on hyvä valinta, kun tarvitaan hiljaista ääntä, pientä välitystä tai vain mekaanista  $90^\circ$  kulmaa.
- *Hammasvaihde* valitaan silloin, kun tarvitaan suurta välityssuhdetta. Vaihteella on myös melko hyvä hyötysuhde.
- *Planeettavaihteella* on hyvä hyötysuhde ja keskitetty akseli. Tavallisesti vaihde kestää suuria momentteja.

Vaihteen valinnassa on tiedettävä sen tuleva sijainti ja vaaditut ominaisuudet. Valinnassa tulee ottaa huomioon mm. käytettävän akselin asento, ensiöakselin suunta toisioakseliin nähden, vaihteen kiinnitys, vaihteen koon määrittäminen, moottorin kiinnittäminen vaihteeseen ja lisävarusteet.

Taulukko 1 Hammasvaihteiden hyötysuhteet muodostuminen välitysportaiden lukumäärästä

Lieriövaihteet	Kartiovaihteet	$\eta$
1-portaiset	x	0,99
2-portaiset	1-portaiset	0,98
3-portaiset	2-portaiset	0,97
4-portaiset	3-portaiset	0,96
x	4-portaiset	0,95
x	5-portaiset	0,94

Planeettavaihteella ja hammasvaihteilla on korkeampi hyötysuhde kierukkavaihteeseen nähden. Kierukkavaihteiden hyötysuhde on vain luokkaa 70- 80 %. Planeettavaihteilla ja hammasvaihteilla päästään tyypistä riippuen yli 95 %:n hyötysuhteisiin. (Kumera 2011.)